

P8 Projektabschluss **Schlussbericht**

Abschlussbericht – 4. Bericht



Projekt PROSE: CH01-03431
Selbstlernende Schienenkopfconditionierung

BERN MOBIL - Städtische Verkehrsbetriebe Bern

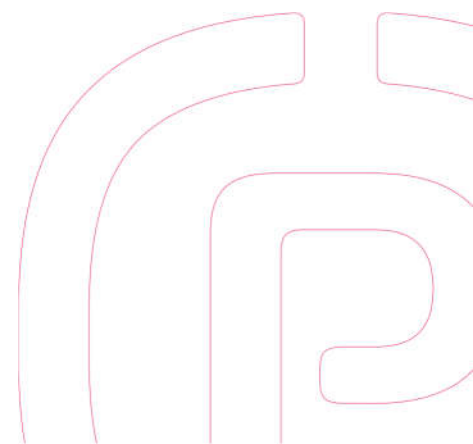
Erstellt	Geprüft		Freigegeben
Felix Saur	Stefan Keiser		Yves Kohler
Dokumentnummer	Version	Status	Ausgabedatum
PO000006419	2.0	Released	05.09.2025

PROSE AG

Monbijoustrasse 35
3011 Bern
Schweiz

www.prose.one

+41 52 262 75 00
info.bern@prose.one



Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Anmerkungen
BERNMOBIL	Stefan Keiser, Matthias Rogger
BAV (Bundesamt für Verkehr)	Markus Liechti, Marco Böttrich

Version	Prepared	Checked	Released	Date
Ver 2.0	Felix Saur	Stefan Keiser	Yves Kohler	05.09.2025
Ver 1.0	Felix Saur	Stefan Keiser	Yves Kohler	20.08.2025

Änderungsverzeichnis

Version	Beschreibung
2.0	Ergänzung Abschnitt 5.3

Impressum

Auftraggeberin:	Schweizerische Eidgenossenschaft; Bundesamt für Verkehr (BAV), CH-3003 Bern. Das BAV ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
Auftragnehmerin	BERNMOBIL, PROSE AG
Autor/Autorin:	Felix Saur, PROSE AG
Begleitung BAV:	Markus Liechti, Marco Böttrich
Hinweis:	Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamt für Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist alleine die Auftragnehmerin verantwortlich.

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Einleitung	8
2.1	Überblick und Einordnung	8
2.2	Ausgangslage Bernmobil	9
2.2.1	Rollmaterial	9
2.2.2	Infrastruktur und Angebotskonzept	9
2.3	Problembeschreibung	10
2.3.1	Lärm durch Strassenbahnen.....	10
2.3.2	Verschleiss Rad-Schiene	11
2.3.3	Ökologische Belastung	12
2.4	Zielsetzung	12
2.5	Involvierte Projektpartner	13
2.5.1	Bernmobil	13
2.5.2	PROSE	13
2.5.3	Substring.....	14
2.5.4	Parametric	14
3	Systembeschreibung selbstlernende Schienenkopfkonditionierung	15
3.1	Fahrzeugausrüstung Serienkonfiguration	15
3.2	Flottenausstattung	16
3.3	Schmiersysteme	16
3.3.1	Stationäre Schmieranlagen	16
3.3.2	Mobile Spurkranzschmierung.....	17
3.3.3	Mobile Schienenkopfkonditionierung.....	17
4	Funktionsweise der selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung	19
4.1	Funktionsschema der i-SKK	19
4.2	Identifikation der Lärmhotspots	19
4.3	Bestätigung der Konditionierpunkte und Grundkonditioniertrate	21
4.4	Prinzip des virtuellen Schmiertopfs	22
4.4.1	Präventive Konditionierung.....	22
4.4.2	Prognostische Konditionierung	23
4.4.3	Reaktive Konditionierung	23
4.5	Dynamischen Konditioniertrate	23
5	Ergebnisse	25
5.1	Untersuchte Einflussfaktoren auf das Kurvenquietschen	25
5.2	Auswahl und Festlegung der PoC-Strecke	28
5.3	Übersicht Messung auf der PoC-Strecke	29
5.4	Lärmreduktion	29
5.5	Verschleissreduktion	32
5.6	Reduktion Konditionierungsmittel	35
5.7	Akustisches Rad-Schiene Kontaktmonitoring	36
5.7.1	Detektion Bedarf Spurkranzschmierung (SKS)	36
5.7.2	Detektion Riffelbildung.....	37

6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	39
6.1	Bepreisung von Lärminderungsmaßnahmen.....	39
6.2	Einsparungspotenzial durch Schmiermittelreduktion	41
6.3	Einsparungspotenzial durch Verschleissreduktion	41
7	Edge Konzept	42
7.1	Anpassungen Hard- und Software	42
7.2	Vorteile der Edge Verarbeitung	42
7.3	Nachteile der Edge Verarbeitung.....	43
8	Referenzen.....	44

Anhang

A	Konfusionsmatrix	45
----------	-------------------------------	-----------

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Beschreibung/Erklärung
μ	Kraftschlusskoeffizient
Be 4/6 Tk	5-teiliges Combino Tram
Be 6/8 VL	7-teiliges Combino Tram
Be 6/8 XL	7-teiliges Combino Tram
Edge	dezentrale Datenverarbeitung
ER	Einrichtungsfahrzeug
HMI	Human-Maschine-Interface
IMU	Inertial Measurement Unit
Kurvenkratzen	Breitbandiger Lärm verursacht durch intensiven Spurkranzkontakt
Kurvenquietschen	Tonaler Lärm verursacht durch selbsterregte Schwingungen im Kontaktpunkt
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandart)
MKS	Mehrkörpersysteme
ML	Maschine Learning
PoC	Proof of Concept
QI	Quietschindex
RET	Messsystem von Parametric
SIMPACK	Mehrkörper-Simulationssoftware
SKK	Schienenkopfkonditionierung
i-SKK	KI-basierte Schienenkopfkonditionierung
SKS	Spurkrankschmierung
i-SKS	KI-basierte Spurkranzschmierung
Ty	«T-Gamma» Reibenergie, englisch «Wear Number»
Ultra-S Rad	Hocheinfedernde, gummigefederte Räder
V60-Rad	Gummigefederte Räder (Standardversion)
ZR	Zweirichtungsfahrzeug

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die relevanten Eckpunkte und die Ergebnisse des Projekts „Selbstlernende Schienenkopfkonditionierung“ zusammen. Im Laufe des Projekts wurde im Projektteam der offizielle Projektname „Parametrierung einer selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung“ in „intelligente Schienenkopfkonditionierung“ kurz „i-SKK“ umgewandelt. Diese kürzere und prägnantere Bezeichnung soll im folgenden Bericht verwendet werde.

Das Projekt hat zum Ziel durch die optimale Aktivierung einer bereits bestehenden mobilen Schienenkopfkonditionierungsanlage eine Reduktion des Kurvenlärms, des Rad-Schiene-Verschleisses und des Konditioniermittelverbrauchs zu erreichen. Eine bedarfsgerechte Aktivierung der SKK wird mithilfe von künstlicher Intelligenz (KI) erreicht, die den optimalen Zeitpunkt und Ort der Aktivierung automatisch festlegt. Die Funktionsweise der eingebauten SKK-Anlage bezüglich Sprühdauer, Sprühmenge oder individueller Ansteuerung einzelner Düsen wird nicht verändert.

Für das Projekt wurden 15 Strassenbahnen von Bernmobil mit einer Messausrüstung ausgestattet, die mittels drei Mikrofonen ein Lärmmapping auf grossen Teilen des Bernmobilnetzes ermöglicht. Das Messsystem wird in das Lauffahrwerk eingebaut, wo auch die Konditionieranlage der Schienenkopfkonditionierung verbaut ist. Das Messsystem ist fahrzeugunabhängig konzipiert, kann dementsprechend in verschiedensten Strassenbahnen eingebaut werden und benötigt lediglich eine Spannungsversorgung.

Die mit dem Messsystem erfassten und verorteten Audiodaten aller Strassenbahnen werden ungefiltert über das Mobilfunknetz (LTE) an eine zentrale Speichereinheit (Cloud) gesendet. Dieser Datenupload verläuft permanent, sendet aber nur die Daten des sich in Bewegung befindlichen Fahrzeugs. In der Cloud findet ein komplexer Prozessierungsschritt statt, der alle relevanten Frequenzanteile isoliert, gewichtet und schliesslich einen „Quietschindex“ (QI) ermittelt, der als Kriterium für die Intensität des Kurvenquietschens dient. Der QI wird mit meteorologischen Daten über einen längeren Zeitraum einem Maschine Learning (ML-Modell) zugeführt. Dieses ML-Modell als Form der KI lernt unter welchen Randbedingungen, zu welchem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort auf der Strecke Kurvenquietschen auftritt. Basierend auf der Häufigkeit und Intensität des Kurvenquietschens wird für jeden identifizierten Lärm-Hotspot von der KI eine Grundkonditionierrate ermittelt, die vom Betreiber bestätigt werden muss.

Für jeden Lärm-Hotspot wird ein „virtueller Schmiertopf“ definiert, der den Konditionierbedarf repräsentiert. Der durch die Grundkonditionierrate dynamisch variable Füllstand des virtuellen Schmiertopfs wird durch drei weitere Faktoren zusätzlich beeinflusst:

- die präventive Konditionierung als Möglichkeit des Betreibers die Grundkonditionierrate an bestimmten lärmsensitiven Streckenpunkten manuell derart zu erhöhen, sodass Lärmereignisse auf ein Minimum reduziert werden.
- die prognostische Konditionierung, die Mithilfe des ML-Modells basierend auf der Wettervorhersage in Abhängigkeit der Umweltbedingungen Lärmereignisse antizipiert, um entweder prophylaktisch zu konditionieren und Lärmereignisse im Vorfeld zu verhindern oder im Fall von Regen nicht zu konditionieren und den Konditioniermittelverbrauch zu reduzieren.
- die reaktive Konditionierung, welche beim Auftreten von Lärmereignissen sofort den Konditionierbedarf erhöht, damit die folgende Strassenbahn an entsprechender Stelle konditioniert und eine länger anhaltende Lärmbelastung verhindert.

Nach der Aktivierung der i-SKK am 4. März 2025 auf der PoC-Strecke zwischen Wankdorf und Kursaal wurde eine Lärmreduktion bezüglich Kurvenquietschen von 98,5 % im Zeitraum 4 Tage vor und 4 Tage nach der Aktivierung gemessen. Diese immense Lärmreduktion wird einerseits durch eine starke Reduktion von Anzahl an Lärmereignissen als auch durch weniger laute Lärmereignisse erreicht.

Durchgeführte Verschleissimulationen mit einem MKS-Modell (Mehrkörpersysteme) des Stadler Tramlink Fahrzeugs auf der PoC-Strecke wurde eine Reduktion des Radlaufflächenverschleisses um 12 % durch eine i-SKK berechnet. Eine intelligente Spurkranzschmierung (i-SKS), die nicht Gegenstand dieses Projekts war, ermöglicht eine Verschleissreduktion von jeweils 9 % am Spurkranz und der Schienenflanke. Die Verschleissuntersuchungen deuten darauf hin, dass eine SKK bei Strassenbahnen mit konventionellen Radsätzen, wie dem Stadler Tramlink, insbesondere dann eine Reduktion des Radlaufflächenverschleisses zu erwarten ist, wenn die SKK beidseitig und an möglichst vielen Kurven erfolgt. Aufgrund der vielen engen Kurven und der speziellen Rad-Schiene-Profilgeometrien ist diese Aussage nicht ohne weiteres auf Vollbahnen übertragbar.

Mithilfe der prognostischen Konditionierung, welche die Randbedingungen auf Grundlage der meteorologischen Daten antizipiert, konnte im Vergleich zu einem nicht intelligenter SKK eine Reduktion des Konditioniermittelverbrauchs um bis zu 60 % ermittelt werden. Die Berechnung erfolgte anhand eines Vergleichs der aufgezeichneten Konditionierimpulse zwischen einem trockenen und regnerischen Tag.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fokussiert sich insbesondere auf die Monetarisierung von Lärmschutzmassnahmen. Diese basiert auf einer Auswertung, welche die Messungen und die Gegebenheiten auf der PoC-Strecke berücksichtigt und vereinfacht auf das restliche Streckennetz skaliert. Bezüglich der prozentual berechneten Reduktion von Verschleiss und Konditioniermittel wird keine finanzielle Angabe verfasst, da diese den individuellen Gegebenheiten der Betreiber unterliegt.

Das untersuchte Edge-Konzept stellt ein alternatives Konzept dar, welches Potenzial zur weiteren Kostenreduktion aufzeigt.

2 Einleitung

2.1 Überblick und Einordnung

Bernmobil führt gemeinsam mit der PROSE AG, Substring (ehemals Lean BI) und Parametric das vom Bundesamt für Verkehr (BAV) unterstützte Forschungsprojekt „selbstlernende Parametrierung einer Schienenkopfkonditionierung“ durch. Das Projekt hat zum Ziel mithilfe von Sensordaten und Künstlicher Intelligenz (KI) eine optimale Konditionierung des Schienenkopfs an Strassenbahnen zu erreichen. Das Optimum stellt in diesem Kontext eine bedarfsgerechte Dosierung des Konditionierungsmittels dar, welche einerseits zu minimalem Verschleiß an Rad und Schiene sowie minimaler Lärmemission führt und andererseits „Überschmierungseffekte“ vermeidet.

Der vorliegende Bericht ist der Abschlussbericht des Projekts. Er beinhaltet die Tätigkeiten im Zeitraum von April 2024 bis August 2025 und baut inhaltlich auf den vorangehenden drei Zwischenberichten auf, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

1. Zwischenbericht - Projektbeschreibung [1]:
 - Beschreibung des Projektkonzepts und den erforderlichen Kompetenzen
 - Bestandsaufnahme bei Bernmobil bezüglich Fahrzeug, Fahrzeugflotte und Infrastruktur
 - Identifizierung der Systemanforderungen und Präzisierung der Aufgabenstellung
 - Definition Projektablauf mit Unterteilung in acht Projektphasen

2. Zwischenbericht - Vorversuche [2]:
 - Fahrzeugausrüstung Prototyp Tramlink 913
 - Beschreibung und Auswertung der Vorversuche
 - Präzisierung der technischen Systemanforderungen

3. Zwischenbericht - Systemevaluation und Prototyp [3]:
 - Anpassungen Fahrzeugausrüstung Prototyp Tramlink 913
 - Beschreibung und Auswertung weiterer Vorversuche
 - Beschreibung der Datenarchitektur und Datensammlung (Big Data)
 - Analyse, Auswertung und Verarbeitung der Big Data

In Kapitel 2 wird kurz auf die Ausgangslage bei Bernmobil, die Problemstellung und die Zielsetzung des Projekts eingegangen. In Kapitel 3 wird die erforderliche Fahrzeugausrüstung beschrieben. Kapitel 5 erklärt die Funktionsweise der entwickelten Lösung. In Kapitel 5 werden die auf der PoC-Strecke ermittelten Ergebnisse präsentiert, bevor in Kapitel 6 ein Wirtschaftlichkeitsbetrachtung insbesondere bezüglich Lärminderung durchgeführt wird. Kapitel 7 geht auf ein alternatives Konzept mit dezentralem Verwaltungsansatz ein.

2.2 Ausgangslage Bernmobil

2.2.1 Rollmaterial

Bernmobil hat insgesamt 27 neue Tramlinkfahrzeuge von der Firma Stadler bestellt, auf denen auch eine fahrzeuggebundene Anlage zur Schienenkopfkonditionierung (SKK) installiert ist. Die neuen Fahrzeuge ersetzen die mittlerweile veralteten Schindler- und Vevey Fahrzeuge. Mittelfristig wird Bernmobil eine heterogene Fahrzeugflotte aus 27 Stadler Tramlinkfahrzeugen und 36 Siemens Combinofahrzeugen betreiben. Von beiden Fahrzeugtypen existieren nochmals unterschiedliche Derivate, wie nachfolgend dargestellt.

Stadler Tramlink (insgesamt 27):

- 13 Zweirichtungsfahrzeuge mit hocheinfederndem UltraS Rad
- 7 Zweirichtungsfahrzeuge mit V60 Rad
- 7 Einrichtungsfahrzeuge mit hocheinfederndem UltraS Rad

Siemens Combino (insgesamt 36, alle mit V60 Rad):

- 7 Be 4/6 Tk – 5-teilig
- 8 Be 6/8 VL – 7-teilig
- 21 Be 6/8 XL – 7-teilig

Der Siemens Combino verfügt über eine Spurkranzschmierung (SKS) die zeitgesteuert alle 240 s, beidseitig aktiviert wird. Im Stadler Tramlink ist in Auslieferungskonfiguration ebenfalls eine Spurkranzschmierung verbaut, die derzeit alle 180 s aktiviert wird. Die Aktivierung erfolgt ebenfalls beidseitig und beim Zweirichtungsfahrzeug (ZR) an der in Fahrtrichtung vorlaufenden Achse des Lauffahrwerks. Zusätzlich ist im Tramlink eine Schienenkopfkonditionierung eingebaut, die an vom Betreiber definierten GPS-Koordinaten aktiviert wird.

Im September 2023 hat Bernmobil die Betriebsbewilligung vom BAV erhalten. Seither sind fortlaufend Tramlinks in den Betrieb von Bernmobil eingeführt worden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts im August 2025 sind alle 20 Tramlink-Zweirichtungsfahrzeuge auf dem Bernmobilnetz im Einsatz. Die Lieferung der Einrichtungsfahrzeuge (ER) steht derzeit noch aus.

2.2.2 Infrastruktur und Angebotskonzept

Aktuell betreibt Bernmobil fünf Strassenbahnlinien:

- Linie 3: Weissenbühl – Bern Hauptbahnhof
- Linie 6: Fischermätteli – Worb
- Linie 7: Bümpliz – Ostring
- Linie 8: Brünnen/Westside – Saali
- Linie 9: Wabern – Wankdorf Bahnhof

Das Angebotskonzept bis 2032 sieht den Betrieb bestimmter Fahrzeugtypen auf bestimmten Linien vor. Das Angebotskonzept von Bernmobil bildet den Rahmen des Betriebs einer intelligenten Schienenkopfkonditionierung, da dieses festlegt, wieviel Fahrzeuge eines bestimmten Typs auf den jeweiligen Linien verkehren. Abbildung 1 zeigt das derzeit geplante zukünftige Angebotskonzept von Bernmobil bis 2032. In Grün sind die Linien dargestellt, die mit dem Tramlink ZR betrieben werden. In Lila sind die Linien aufgeführt, die vom Tramlink ER abgedeckt werden und in Rot sind die mit dem Combino betriebenen Linien markiert.

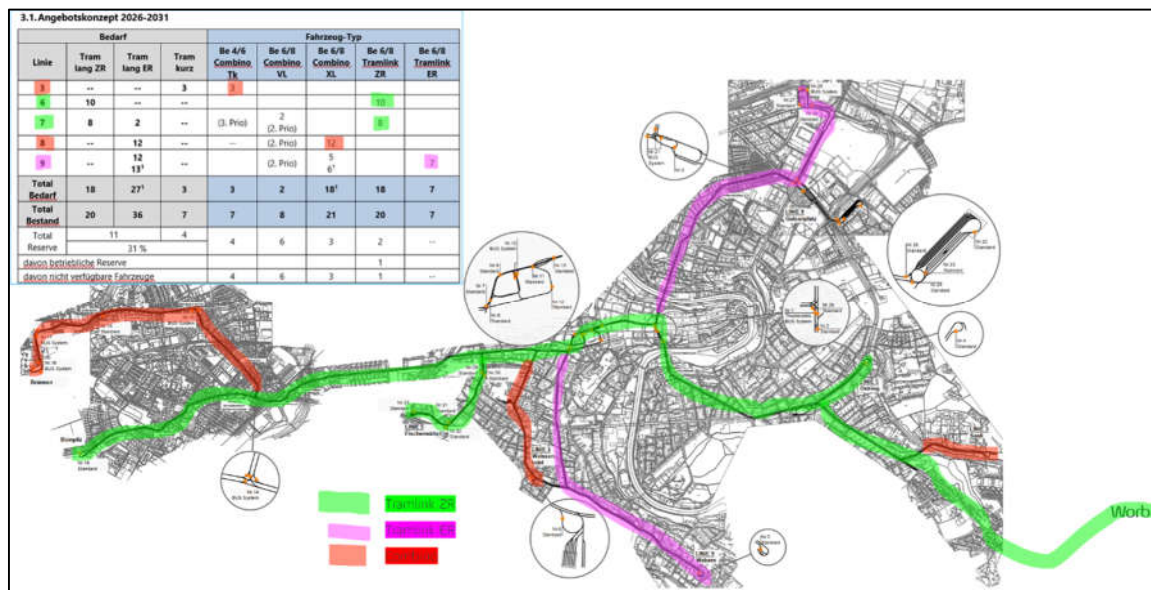


Abbildung 1: Angebotskonzept Bernmobil bis 2032

2.3 Problembeschreibung

2.3.1 Lärm durch Strassenbahnen

Bernmobil betreibt, wie weitere Betreiber in der Schweiz, eine Strassenbahn im urbanen Umfeld. Die Bevölkerungsdichte der Einwohner, die direkt am Streckennetz von Bernmobil wohnen, beträgt in der Regel über 100 Einwohner pro 10'000 m², stellenweise sogar über 200 Einwohner pro 10'000 m² [4]. Werden vereinzelte durch Strassenbahnen verursachte Lärmereignisse von der Bevölkerung meistens noch toleriert, führen länger anhaltende Lärmemissionen zu zahlreichen Beschwerden, die bei Bernmobil eingehen.

Durch Strassenbahnen verursachte Lärmereignisse können wie folgt unterschieden werden:

Kurvenquietschen, verursacht durch eine selbsterregte Reibschwingung im Rad-Schiene-Kontakt zwischen Radlaufläche und Schienenkopf, infolge einer abfallenden Kraftschlussfunktion bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit in Querrichtung, die zu einer Anregung der am niedrigsten gedämpfte Eigenform des Radkörpers, genauer gesagt des Radkranzes führt [5]. Beim UltraS Rad sind dies drei Eigenformen verschiedener Ordnung mit den entsprechenden Eigenfrequenzen bei 690 Hz, 1780 Hz und 3100 Hz, beim V60 Rad eine Eigenform mit einer Eigenfrequenz von 890 Hz. Die Eigenformen des hocheinfedernden UltraS Rades können aufgrund der gegenüber dem V60 Rad höheren Elastizität der Gummielemente zwischen Radkranz und Radsteg leichter angeregt werden, wodurch von einer höheren Lärmbelastung auszugehen ist. In diesem Kontext sei erwähnt, dass aufgrund der hohen Elastizität von einer geringeren Belastung des UltraS Rades auf die Infrastruktur zu rechnen ist.

Das Kurvenquietschen kann durch eine Konditionierung des Schienenkopfs effektiv unterbunden werden, da die Kraftschlussfunktion im Kontaktpunkt durch die Konditionierung keinen ausgeprägten abfallenden Bereich mehr aufweist. Die Beseitigung des Kurvenquietschens ist das primäre Hauptziel dieses Projekts.

Bremsquietschen, verursacht durch eine selbsterregte Reibschwingung im Kontaktpunkt zwischen Brems Scheibe und Bremsbelag. Dabei werden weitestgehend dieselben Rad-Eigenformen angeregt wie beim Kurvenquietschen, wobei die Selbsterregung und damit der Energieeintrag über den

Kontaktpunkt Brems Scheibe zu Bremsbelag erfolgt, der nicht konditioniert werden kann. In der Signalauswertung ist das Bremsquietschen zwingend und eindeutig vom Kurvenquietschen zu unterscheiden. Andernfalls würde beim Bremsen ein Konditionierbedarf gemeldet werden.

Kurvenkratzen, verursacht durch einen intensiven Kontakt zwischen Spurkranz und Schienenflanke. Dieser Kontakt entsteht insbesondere in Kurven mit kleinen Radien und macht sich durch ein breitbandiges Kratzgeräusch bemerkbar. Eine effektive Spurkranzschmierung kann den Lärm und vor allem den Verschleiss erheblich reduzieren. In diesem Kontext sei erwähnt, dass aufgrund der speziellen Rad- und Schienenprofile von Strassenbahnen in Kombination mit engen Kurvenradien im Stadtnetz bei konventionellen Radsätzen (Tramlink) keine Profilverpaarung möglich ist, die eine ausreichende Rollradiendifferenz bereitstellt, um ein schlupffreies Abrollen zu ermöglichen. Ausserdem ist in engen Kurvenradien von einer Spiessgangstellung des Fahrwerks auszugehen, die eine beidseitige Spurkranzschmierung der diagonal gegenüberliegenden Rädern erfordert.

Die drei aufgeführten Lärmereignisse sind die Ursache der meisten Lärmbeschwerden, da aufgrund dieser der Schallpegel teilweise um über 25 dB(A) erhöht wird. Selbstverständlich existieren noch weitere Lärmquellen von Strassenbahnen, die allerdings nicht Gegenstand dieses Berichts bzw. Projekts sind.

2.3.2 Verschleiss Rad-Schiene

Bei der Bewegung eines schienengebundenen Fahrzeugs werden im Rad-Schiene-Kontakt Reibkräfte als Produkt aus Radaufstandskraft und Kraftschlussbeiwert erzeugt. In Kombination mit den Läng- und Querschlüpfen, der Bohrschlupf sei an dieser Stelle vernachlässigt, ergibt sich eine Reibenergie (in der Literatur T_y genannt), die zum Verschleiss an Rad und Schiene führt. Dementsprechend neigen schwere Fahrzeuge bei hohen Kraftschlussbeiwerten zu erhöhtem Verschleiss. Nach Abbildung 2 kann grundsätzlich zwischen zwei Verschleissformen unterschieden werden:

- 1.) zwischen Spurkranz und Schienenflanke und
- 2.) zwischen Radlaufläche und Schienenkopf.

In der Praxis liegt in der Regel eine Kombination aus beiden Verschleissformen vor.

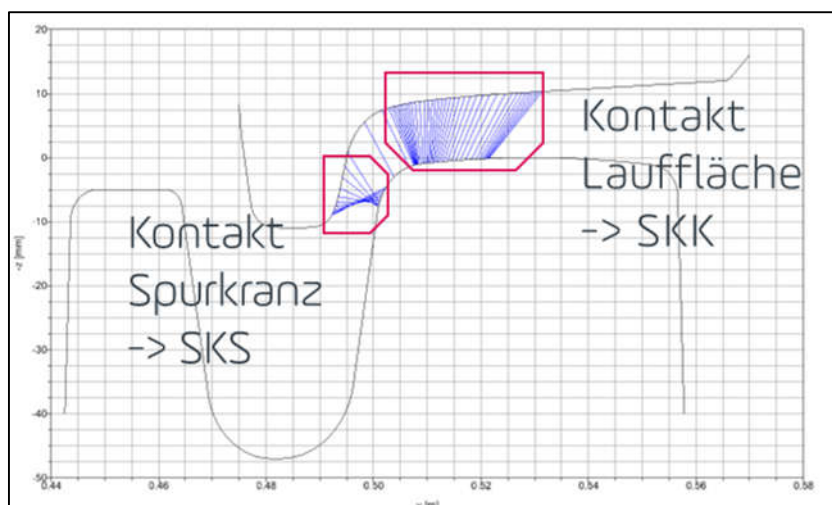


Abbildung 2: Rad-Schiene-Profilpaarung, der bei Bernmobil eingesetzten Neuprofile

Simulationen mithilfe von Mehrkörpersystemen (MKS) zeigen, dass der Verschleiss zwischen Schienenkopf und Lauffläche tendenziell zu einer Abnützung des Radkörpers (erkennbar durch z.B. Hohllauf) führt, wohingegen der Verschleiss zwischen Spurkranz und Schienenflanke zu einem

Materialabtrag an der Schienenflanke und dem Spurkranz am Radkörper führt. Letzteres macht sich z.B. durch eine Änderung des qr-Masses bemerkbar.

Im Kontext des durchgeführten Projekts darf aufgrund der Konditionierung des Schienenkopfs von einer Reduktion des Verschleisses der Radlaufflächen ausgegangen werden. Für eine weitere Reduktion des Verschleisses von Spurkranz- und Schienenflanken ist eine entsprechende Optimierung der Spurkranzschmierung vorzunehmen.

2.3.3 Ökologische Belastung

Der Verbrauch von Schmiermittel, sei es durch die mobile Spurkranzschmierung, die mobile Schienenkopfkonditionierung oder durch die stationären Schmieranlagen ist beträchtlich und beträgt bei Bernmobil ca. drei Tonnen pro Jahr, wobei die stationären und mobilen Anlagen in etwa gleich viel Schmiermittel verbrauchen. Aufgrund der in der Regel geschlossenen Fahrbahndecke gelangt das Schmiermittel in die Kanalisation und muss dort entsprechend abgedichtet werden.

Zu viel aufgebracht Schmiermittel belastet unnötig die Umwelt. So wird auf der Schiene haftendes Schmiermittel vom Verkehr oder Fußgängern beim Queren der Schienen aufgenommen und weiterverteilt.

2.4 Zielsetzung

Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer intelligenten, bedarfsgerechten Schienenkopfkonditionierung (i-SKK), die nur so viel Konditioniermittel verbraucht wie unbedingt notwendig. In diesem Zusammenhang sollten sowohl die Lärmereignisse durch Kurvenquietschen, der Radlaufflächenverschleiss als auch der Verbrauch von Konditioniermittel auf ein Minimum reduziert werden. Der Funktionsnachweis in Form eines „Proof of Concept“ (PoC) ist auf einer Streckenlinie zu erbringen. Zu Beginn des Projekts wurden folgende Erwartungen an die i-SKK seitens Bernmobil formuliert:

- Eine **generell deutliche Lärmreduzierung**.
- Weitgehendste **Eliminierung der temporären Lärmemissionen nach Veränderungen der Umweltbedingungen** (Temperatursturz, Wetterwechsel), bis die heutigen stationären Schmiereinrichtungen sich wieder eingestellt haben.
- Weitgehendste **Eliminierung der temporären Lärmemissionen nach Veränderungen der Betriebslage** (Veränderter Flotteneinsatz, temporäre Sperrungen wegen Bauarbeiten) bis die heutigen stationären Schmiereinrichtungen wieder angepasst wurden.
- **Ausserbetriebnahme der 40 bestehenden stationären Schmiereinrichtungen***.
- **Nicht Realisierung der projektierten, neuen stationären Schmiereinrichtungen auf der Linie Ostermundigen***
- **20% Reduktion der eingesetzten Schmiermittel** mit dem Wechsel von stationärer auf mobile Schmierung mit angenommenem Effizienzverhältnis von 5:1
- Es wird erwartet, dass die aktuell bestehende **Schienenreinigung** aufgrund der Bildung von **Schwarzbelag** ganz entfallen.
- **Verlängerte Radreifenstandzeit von 10%**.

Zu einem frühen Zeitpunkt des Projekts wurde offensichtlich, dass eine Abschaltung der stationären Schmieranlagen ohne gesamtheitliche Perspektive, sprich einer gleichzeitigen Optimierung der Spurkranzschmierung (i-SKS) analog zur i-SKK, unrealistisch ist. Wie im späteren Verlauf dieses Berichts noch genauer beschrieben wird, kann der Lärm infolge von Kurvenquietschen und ein

Radlaufflächenverschleiss durch die mobile Schienenkopfkonditionierung erfolgreich unterdrückt werden. Allerdings tragen stationäre Schmieranlagen, insbesondere in engen Kurven, ebenso zu einer signifikanten Schmierung des Spurkranzes und der Schienenflanke bei, die einerseits deren Verschleiss und andererseits ein sicherheitskritisches Aufklettern des Spurkranzes auf den Schienenkopf verhindern. Dementsprechend können die mit einem Stern (*) markierten Erwartungen, welche die Abschaltung von stationären Schmieranlagen betreffen, durch das angestrebte Projektvorhaben mit einer i-SKK nicht vollumfänglich erfüllt werden.

2.5 Involvierte Projektpartner

Die Anforderungen an eine «selbstlernende Schienenkopfkonditionierung» erfordern verschiedenste Kompetenzen mit hohem Detaillierungsgrad. Dementsprechend waren nach Abbildung 3 mehrere Unternehmen an der Entwicklung beteiligt.



Abbildung 3: Involvierte Projektpartner

2.5.1 Bernmobil

Die städtischen Verkehrsbetriebe Bern betreiben den öffentlichen Verkehr der Stadt Bern und sind Antragssteller des Projekts „selbstlernende Schienenkopfkonditionierung“. Bernmobil beteiligt sich finanziell mit 40 % Eigenmittel an diesem Projekt. Inhaltlich unterstützt Bernmobil mit:

- Zur Verfügungstellung von Einsatzfahrzeugen
- Integration und Einbau der erforderlichen Hardware
- Durchführung von Testfahrten
- Zur Verfügungstellung der erforderlichen bernmobilinternen Ressourcen
- Expertise Betrieb und Instandhaltung von Strassenbahnen
- Erfahrungen bislang verwendeter Schmiersysteme (stationär und mobil)
- Elektrische Expertise zur Integration der Hardware in die Strassenbahnen
- Projektleitung

Ansprechpartner seitens Bernmobil sind Stefan Keiser, Hauptprojektleiter Beschaffung Tramlink, stefan.keiser@bernmobil.ch und Matthias Rogger, Projektleiter Tram Elektrik, Matthias.rogger@bernmobil.ch.

2.5.2 PROSE

Die PROSE AG (www.PROSE.one) ist Engineering- und Consultingdienstleister im Mobilitätssektor und hat Bernmobil bei der Antragstellung unterstützt. PROSE wurde durch Bernmobil mit der kommerziellen und technischen Projektleitung für das beschriebene Projekt beauftragt. Inhaltlich liefert PROSE folgende Aspekte:

- Gemeinsame kommerzielle Projektleitung mit Bernmobil
- Technische Projektleitung
- Eisenbahn Knowhow
- Konzeptionelle Systementwicklung und Vorgehen
- Identifizierung und Zusammenstellung der weiteren Projektpartner
- Interpretation und Validierung der Ergebnisse
- Konzeption und Spezifikation von Hardware, Versuchen und weiterem
- Rapporting und Präsentation

Ansprechpartner bei PROSE sind Yves Kohler, kommerzieller Projektleiter, yves.kohler@prose.one und Dr. Felix Saur, technischer Projektleiter, felix.saur@prose.one.

2.5.3 Substring

Substring (www.substring.ch) ist spezialisiert auf das Automatisieren, Analysieren und Optimieren von Daten und liefert inhaltlich folgende Kompetenzen:

- Software Knowhow im Bereich KI (Künstliche Intelligenz) und Data Science
- Datenmanagement und -Verwaltung
- Aufbau von Schnittstellen und Datenpipelines
- Datenfilterung- und -Prozessierung
- Entwicklung der KI-Lösung zur Aktivierung der Schienenkopfkonditionierung
- Datenvisualisierung in Form von Dashboards und HMI (Human-Maschine-Interface)

Ansprechpartner bei substring sind Dr. Marc Tesch und Eric Rufer, beide Business Development, m.tesch@substring.ch und e.rufer@substring.ch, Dr. Sebastian Lienert und Joël Zbinden, beide Data Scientist & ML Engineer, s.lienert@substring.ch und j.zbinden@substring.ch.

2.5.4 Parametric

Parametric (www.parametric.ch) liefert die Hardware zur Datenakquisition und Datenübertragung (IoT-Gateway) und trägt mit folgenden Kompetenzen zur inhaltlichen Lösung bei:

- Konzeption und spezifische Entwicklung Hardware
- Bereitstellung der Hardware und der Sensorik
- Synchronisierung und Verortung der Messdaten
- Datenübertragung und Bereitstellung
- Entgegennahme und Weiterleitung des SKK-Befehls

Ansprechpartner ist Andreas Koschak, Geschäftsführer von Parametric (akoschak@parametric.ch).

3 Systembeschreibung selbstlernende Schienenkopfkonditionierung

3.1 Fahrzeugausrüstung Serienkonfiguration

Basierend auf den durchgeführten Vorversuchen [2] wurde das Messsystem analog zu dem erfolgreich getesteten Prototyp [3] konzipiert. Die Einbausituation bleibt folglich gemäss Abbildung 4 gegenüber dem Prototyp unverändert. Das Messsystem inklusive Sensorik wird am Lauffahrwerk der in Abschnitt 3.2 aufgeführten Tramlinks eingebaut. Insgesamt werden drei Mikrophone verwendet: zwei externe Mikrophone, jeweils ein Mikrophon vor und eins hinter dem Lauffahrwerk (Position 2 und 3) und ein internes Mikrophon, das im Anschlussstecker des Messsystems (RET 4231) [9] platziert ist (Position 1). Bei den externen Mikrophenen handelt es sich um zwei aufeinander abgestimmte Kleinmembran-Kondensatormikrophone (Rode M5), die eine Empfindlichkeitsabweichung kleiner 1 dB aufweisen. Ziel der beiden externen Mikrophone ist, die Lärmquellen ausgehend von den angetriebenen Fahrwerken (Bogie 1, 3 und 4) vor und hinter dem Laufwerk (Bogie 2), in dem die Sensorik verbaut ist, möglichst präzise zu identifizieren. Die in Abbildung 4 erkennbaren, mit einem 3D Drucker gefertigten Trichter zur Verstärkung der Richtfunktion, werden in der Serie nicht mehr verwendet, da diese bei hohen Geschwindigkeiten zu starken aerodynamischen Turbulenzen mit entsprechenden akustischen Störgeräuschen führten. Das im Stecker des Messsystems integrierte Mikrophon ist als geschützte, redundante Sensorlösung angedacht. Die in den Vorversuchen eingebauten Messmikrophone von der Marke PCB Piezotronics werden aufgrund der hohen Kosten nicht mehr verwendet. Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass die bessere Qualität der Mess- gegenüber den Studiomikrophenen im hier vorliegenden Anwendungsfall nicht relevant ist. Langfristig ist eine weitere Reduktion der Systemkosten durch noch günstigere Mikrophone denkbar. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die unter dem Fahrzeug exponiert positionierten Rode M5 Mikrophone während der Betriebsdauer von November bis August ohne Ausfälle funktionierten. Der Lufttemperaturbereich betrug in diesem Zeitraum von -11°C bis +34°C und die relative Luftfeuchtigkeit variierte zwischen 34 % und 99 %.

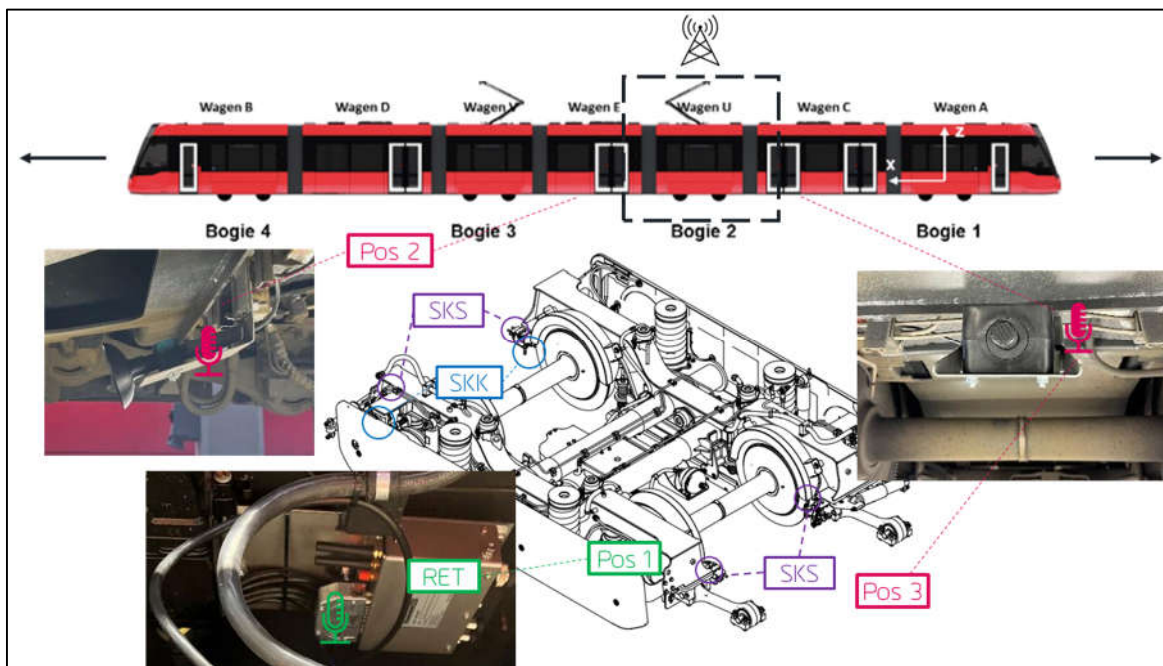


Abbildung 4: Fahrzeugausrüstung am Tramlink ZR

3.2 Flottenausstattung

Das in Abschnitt 3.1 beschriebene Messsystem wurde in 15 Strassenbahnen der Bernmobilflotte verbaut. Konkret wurden folgende Fahrzeuge mit der für die selbstlernende Schienenkopf-konditionierung erforderlichen Hardware ausgerüstet:

- 12 x Stadler-Tramlink ZR mit UltraS Rad
- 2 x Stadler-Tramlink ZR mit V60 Rad
- 1 x Siemens-Combino mit V60 Rad

Für den angestrebten PoC sind nur die Tramlink-Fahrzeuge mit dem UltraS Rad relevant. Die beiden Tramlink mit V60 Rädern wurden ausgestattet, um das akustische Verhalten zwischen zwei baugleichen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Rädern zu vergleichen. Mit der Ausstattung des Combinos soll das akustische Verhalten zwischen zwei Fahrzeugen mit gleichen Rädern und unterschiedlicher Fahrzeugarchitektur sowie zwischen zwei komplett verschiedenen Fahrzeugen betreffend Architektur und Rädern analysiert werden. In diesem Kontext ist insbesondere der jeweilige akustische Fingerabdruck in Form eines Spektrogramms interessant, der Aufschluss über die individuellen relevanten Frequenzanteile gibt. Ausserdem ist ein deutlicher Unterschied bezüglich der Lärmbelastung hinsichtlich der Höhe des Schallpegels in dB(A) eines einzelnen Lärmereignisses als auch der Anzahl vom Lärmereignissen zu erwarten.

3.3 Schmiersysteme

Bernmobil hat aktuell verschiedene Anlagen zur Schmierung und/oder Konditionierung von Rad und/oder Schiene im Einsatz auf die im Folgenden eingegangen wird.

3.3.1 Stationäre Schmieranlagen

Die stationären Schmieranlagen sind an neuralgischen Punkten, sprich lärm- oder verschleiss-intensiven Kurven, auf dem Streckennetz von Bernmobil verbaut. Aktuell betreibt Bernmobil etwa 40 dieser in Anschaffung und Unterhalt kostspieligen stationären Schmieranlagen.

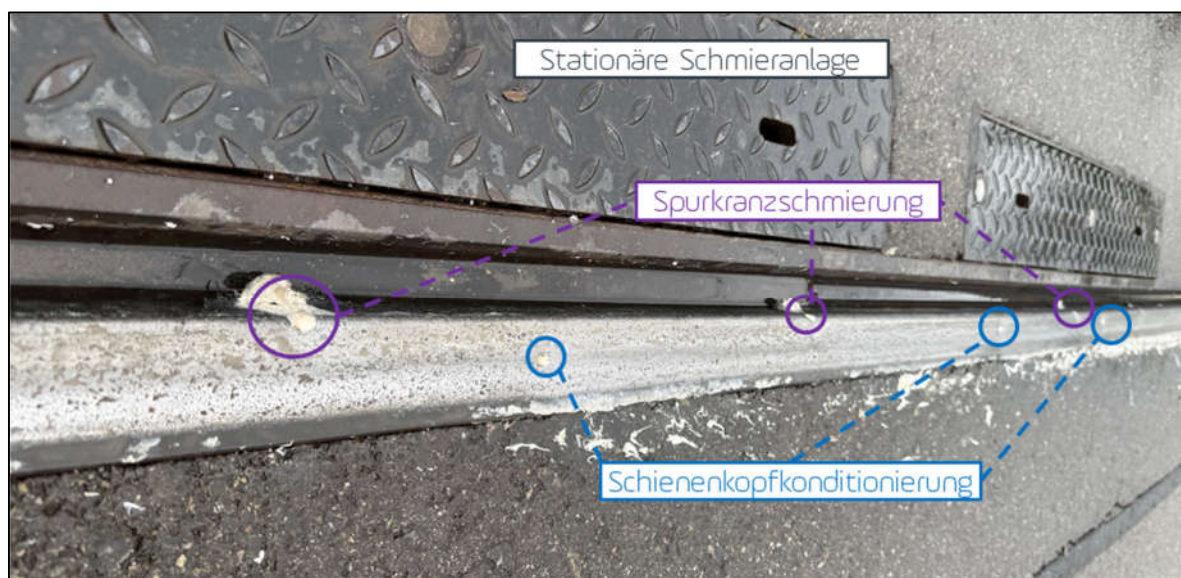


Abbildung 5: Stationäre Schmieranlage in Bern

Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine Schiene bzw. Seite einer stationären Schmieranlage in Bern. Es sind mehrere Löcher in der Schiene vorhanden, durch die das weisse Schmiermittel gedrückt wird. Die lila markierten Löcher sind am Übergang von Schienenkopf zur Schienenflanke platziert und

dienen der Schmierung des Spurkranzes am Rad. Die blau markierten Löcher sind auf dem Schienenkopf angeordnet und konditionieren die Radlaufläche. Unabhängig von der Anordnung der Löcher wird von der stationären Schmieranlage nur ein Schmiermittel verwendet. Aufgrund der beschriebenen Funktionsweise sollen die stationären Schmieranlagen sowohl Lärm als auch Verschleiss reduzieren.

Die Schmiermenge kann für jede stationäre Anlage separat eingestellt werden. Ein Schmierhub wird ausgelöst, wenn eine bestimmte Anzahl von Achsen die stationäre Anlage überfahren hat, wobei die Anzahl an Achsen eingestellt werden kann. Zusätzlich kann die Schmiermittelmenge in Abhängigkeit der Temperatur variiert werden, um die temperaturabhängigen Viskositätseigenschaften des Schmiermittels zu berücksichtigen.

In Abbildung 5 ist erkenntlich, wieso stationäre Schmieranlagen nur teilweise zuverlässig funktionieren. In diesem Fall ist eine starke Überschmierung vorhanden, die sich einerseits durch eine starke Anhäufung des Schmiermittels an der Schienenflanke bzw. in der Rillenschiene und andererseits auf dem Asphalt neben der Schiene bemerkbar macht. Eine Überwachung der stationären Anlagen kann nur durch eine Besichtigung vor Ort gewährleistet werden.

3.3.2 Mobile Spurkranzschmierung

Auf dem Tramlink ZR ist nach Abbildung 6 eine Spurkranzschmierung verbaut, die auf beiden Achsen bzw. allen vier Rädern des Lauffahrwerks Schmiermittel auf den Radrücken bzw. den Spurkranz sprüht, pro Rad kommen dem entsprechend zwei Düsen zum Einsatz. In Abhängigkeit der Fahrtrichtung werden nur die Düsen an der vorlaufenden Achse aktiviert. Die Spurkranzschmierung ist bei den Fahrzeugen von Bernmobil zeitgesteuert und wird im Intervall von 180 s oder 240 s aktiviert. Abbildung 6 zeigt auf der linken Seite die Ausrichtung einer der beiden Düsen pro Radseite auf den Rücken des Radkranzes und auf der rechten Seite die Positionierung aller SKS-Düsen im Lauffahrwerk.

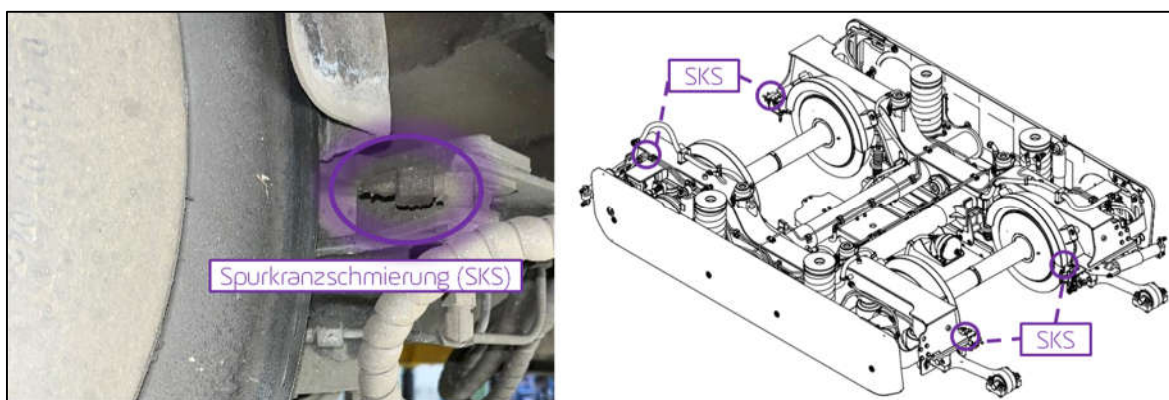


Abbildung 6: Im Tramlink ZR eingebaute Spurkranzschmierung

3.3.3 Mobile Schienenkopfkonditionierung

Beim Tramlink ZR ist eine Schienenkopfkonditionierung am Lauffahrwerk in Richtung Wagenmitte verbaut. Die Schienenkopfkonditionierung umfasst zwei Düsen, die jeweils auf den Schienenkopf der linken und rechten Schiene ausgerichtet sind. Die Schienenkopfkonditionierung ist im Auslieferungszustand GPS-gesteuert und kann so durch den Betreiber ortsbasiert angesteuert werden. Abbildung 7 zeigt die Position der SKK-Düse auf einer Seite und die Anordnung der Düsen im Lauffahrwerk.

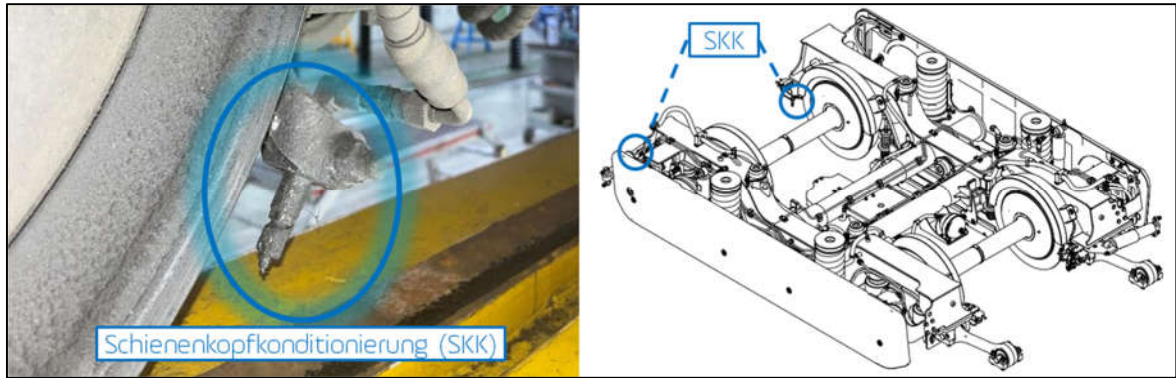


Abbildung 7: Im Tramlink ZR eingebaute Schienenkopfkonditionierung

4 Funktionsweise der selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung

4.1 Funktionsschema der i-SKK

Das grundsätzliche Funktionsschema der i-SKK wird anhand von Abbildung 8 erklärt. Die 15 Strassenbahnen senden permanent verortete Audiodaten, die während der Bewegung des Fahrzeugs aufgenommen wurden an eine zentrale Speichereinheit (1). Dort werden die meteorologische Wetterdaten geografisch und zeitlich mit den Audiodaten synchronisiert (2) und daraus der verortete Quietschindex berechnet, der der KI in Form eines ML-Modells zugeführt wird (3). Aufgrund der statistischen Kombinatorik identifiziert die KI über einen längeren Zeitraum bestehende Korrelationen zwischen dem Auftreten von Kurvenquietschen und den jeweils vorherrschenden meteorologischen Randbedingungen. Auf Basis des Lärm mappings, welches die Häufigkeit und Intensität von Lärmereignissen aufzeigt, werden die relevanten Lärm-Hotspots auf dem Streckennetz identifiziert (genaue Beschreibung folgt in Abschnitt 4.2). Ausserdem wird für jeden Lärm-Hotspot eine Grundkonditioniertrate ermittelt (4). Für jeden Lärm-Hotspot wird, wie später in Abschnitt 4.4 beschrieben ein virtueller Schmiertopf generiert, dessen Grundkonditioniertrate durch präventive, prognostische und reaktive Einflussfaktoren dynamisch verändert wird (5). Diese dynamische Änderung führt zu einem bestimmten Füllstand in jedem Schmiertopf, welcher den individuellen aktuellen Bedarf an Konditioniermittel für jeden ermittelten Lärm-Hotspot repräsentiert. Aus dem Verhältnis zwischen Bedarf und dem Verbrauch wird schliesslich ein automatischer Befehl zur Aktivierung der SKK am jeweiligen Lärm-Hotspot an die Fahrzeuge gesendet.

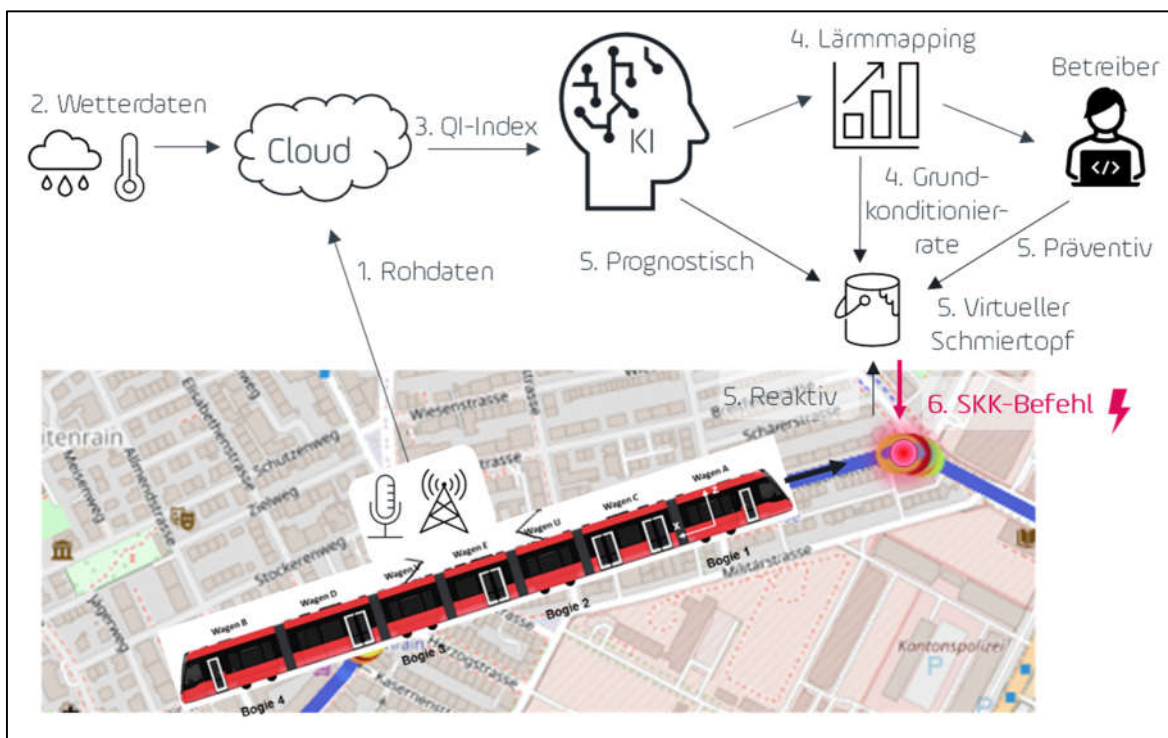


Abbildung 8: Grundsätzliches Funktionsschema der i-SKK

4.2 Identifikation der Lärmhotspots

Zur Identifikation der Lärm-Hotspots wird das Signal des Kurvenquietschens aus den unkomprimierten Audiodaten berechnet, die während der Fahrt mit einer Abtastrate von 10 kHz aufgezeichnet werden. Zur Berechnung des Frequenzspektrums wird das Audiosignal mittels Short-Time Fourier-Transformation (STFT) in überlappende Zeitfenster segmentiert, sodass das

resultierende Spektrogramm $X(f,t)$ die zeitliche Änderung des Frequenzspektrums abbildet. Aus diesem Spektrogramm lassen sich die beim Tramlink mit UltraS-Rad drei charakteristische Quietschfrequenzbänder isolieren, aus denen ein Quietschindex „QI“ berechnet wird. Der QI ist dementsprechend ein Mass, welches die Intensität des Kurvenquietschen basierend auf der Energiedichte der relevanten Frequenzbänder beschreibt.

Da zusätzlich synchronisierte GPS-Daten mit Position und Geschwindigkeit vorliegen, kann der QI weiter optimiert werden: Über das Geschwindigkeitssignal werden Phasen als Bremsvorgänge erkannt und daraus resultierendes Bremsquietschen automatisch vom QI ausgeschlossen. Gleichzeitig ermöglicht die Georeferenzierung eine präzise Zuordnung jedes Quietschereignisses zu einer Streckenposition, was die Analyse und Bewertung der einzelnen Quietsch-Hotspots ermöglicht.

Abbildung 9 zeigt auf der linken Seite den ermittelten QI in Abhängigkeit der Zeit, der auf Grundlage aus dem in der Mitte dargestellten Spektrogramm ermittelt wird. Der QI wird mit den deutlich niederfrequenter abgetasteten GPS-Daten (5 Hz) synchronisiert und wird anschliessend auf dem Streckennetz von Bernmobil verortet (rechte Abbildung).

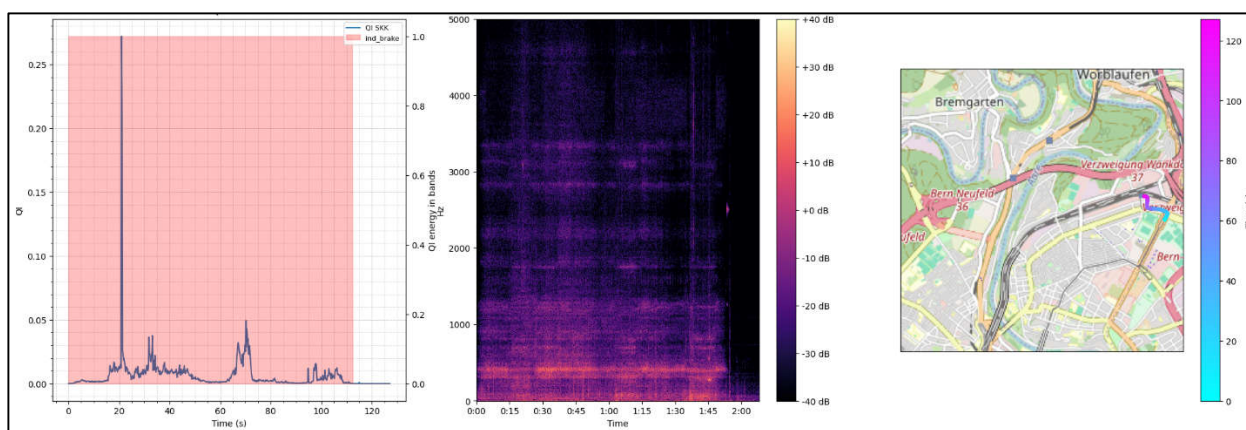


Abbildung 9: Auffälliger Frequenzbereich bei intensivem Spurkranzkontakt und ausbleibender Spurkranzschmierung

Der QI wird über einen längeren Zeitraum ermittelt und auf dem Streckennetz verortet. Die Auswertung mittels Quantile ermöglicht im Gegensatz zur Darstellung von Maximalwerten eine Interpretation der durchschnittlichen Lärmbelastung über den betrachteten Zeitraum. Aus dieser Betrachtung werden die GPS-Koordinaten der relevanten Lärm-Hotspots ermittelt. In diesem Projekt wurde ein 90%-Quantil über einen Zeitraum von drei Monaten (Anfang Dezember 2024 bis Ende Februar 2025) als Identifikationsgrundlage der Lärm-Hotspots gewählt.

Grundsätzlich wird die Betrachtung über einen längeren Zeitraum empfohlen, da diverse Lärm-Hotspots erst unter extremen Umweltbedingungen, z.B. sehr trockene Verhältnisse bei sehr niedrigen Temperaturen, erscheinen. Bei zu kurzen Betrachtungszeiträumen können unter Umständen nicht alle Hotspots identifiziert werden. In diesem Kontext sei erwähnt, dass saisonale Witterungsumstände einen grossen Einfluss auf die Lärmbelastung durch das Kurvenquietschen haben können.

Im vorliegenden Projekt wurde ein laufender Abgleich zwischen den ermittelten und ggf. neu entstehenden Lärm-Hotspots mit zunehmender Projektdauer bis Juli 2025 durchgeführt, wobei keine neuen Lärm-Hotspots auf der PoC-Strecke (siehe Abschnitt 5.2) identifiziert wurden. In Abbildung 10 sind die identifizierten Lärm-Hotspots auf der PoC-Strecke abgebildet.

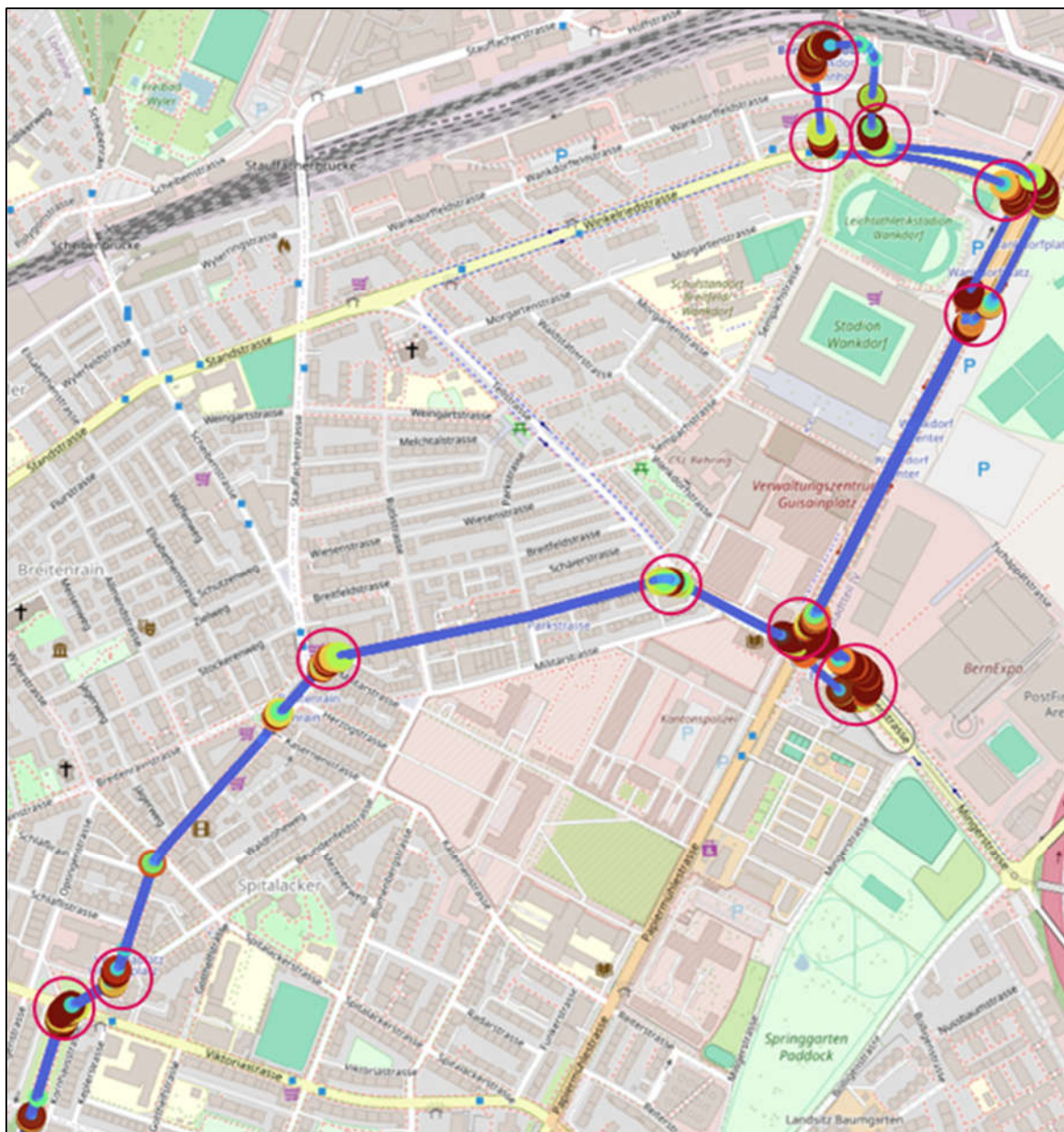


Abbildung 10: Identifizierte Lärm-Hotspots auf der PoC-Strecke

4.3 Bestätigung der Konditionierpunkte und Grundkonditionierrate

Basierend auf den Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes wird eine Tabelle (siehe Tabelle 1) mit den identifizierten Lärm-Hotspots ausgegeben. Jede Zeile beschreibt ein Hotspot mit den jeweils relevanten Informationen wie der Identifikationsnummer (id), einer geografischen Beschreibung, den GPS-Koordinaten mit Längen- (longitude) und Breitengrad (latitude), dem Richtungsvektor (heading) und der Kilometrierung auf der jeweiligen Linie. Zusätzlich leitet das System aus der Quantilsbetrachtung eine Grundkonditionierrate ab, die als Anzahl von gewünschten Konditionierungen pro Stunde interpretiert werden kann.

Damit der Betreiber die Verantwortung für die Position des Konditionierpunkts übernimmt, muss dieser jeden einzelnen identifizierten Konditionierpunkt bestätigen oder verwerfen. Die Schienenkopfkonditionierung wird nur an den vom Betreiber freigegebenen Konditionierpunkten ausgelöst.

Tabelle 1 führt die elf identifizierten und in Abbildung 10 markierten Lärm-Hotspots auf. In vorliegenden Fall wurden zwei der elf Konditionierpunkte durch den Betreiber verworfen. Für beide dieser Hotspots wurde eine niedrige Grundkonditionierrate ermittelt, was auf eine vergleichsweise niedrige durchschnittliche Lärmbelastung hinweist. Der erste Lärm-Hotspot befindet sich zudem in der Anfahrt der Haltestelle Breitenrain, wo aufgrund der Geschwindigkeitsreduktion beim Bremsen eine Konditionierung des Schienenkopfs mit Risiken verbunden sein kann. Der zweite nicht berücksichtigte Lärm-Hotspot befindet sich auf dem Kreisell Viktoriaplatz, an den eine Gefällestrecke bis zur Haltestelle Kursaal folgt.

Anzahl	id	Linie	Beschreibung	latitude	longitude	heading	m	Grundkonditionierrate	Bestätigung
1	32	13	Anfahrt Haltestelle Breitenrain	46.958122	7.454092	184.8	2210	1	nein
2	33	13	Anfahrt Viktoriaplatz	46.955123	7.451359	213.5	2610	3	ja
3	34	14	Kreisell Viktoriaplatz	46.954714	7.450580	55.8	4380	1	nein
4	35	14	Ecke Moserstrasse-Spitalackerstrasse	46.956498	7.452107	33.7	4620	3	ja
5	36	14	Ausfahrt Haltestelle Breitenrain	46.959034	7.455272	65.4	4990	3	ja
6	37	14	Ecke Rodtmattstrasse-Tellstrasse	46.960032	7.461276	85.1	5460	3	ja
7	38	14	Guisanplatz Scheitel Wendekreis	46.958622	7.464655	104.9	5760	3	ja
8	39	14	Ausfahrt Guisanplatz	46.959304	7.464134	320.9	5900	3	ja
9	40	13	Ausfahrt Haltestelle Wankdorf Bhf	46.965427	7.464297	122.3	160	3	ja
10	42	13	Ausfahrt Wankdorf Bahnhof	46.966643	7.464142	229.6	20	6	ja
11	43	13	Winkelriedstrasse Papiermühlestrasse	46.964873	7.467684	153.7	430	3	ja

Tabelle 1: Identifizierte Lärm-Hotspots mit entsprechenden GPS-Koordinaten

4.4 Prinzip des virtuellen Schmierkopfs

Für jeden im vorherigen Abschnitt beschriebenen und vom Betreiber bestätigten Lärm-Hotspots wird ein „virtueller Schmierkopf“ definiert, welcher den jeweiligen Bedarf an Konditioniermittel an diesem Lärm-Hotspot symbolisiert. Der dynamisch variable Füllstand des virtuellen Schmierkopfs wird durch drei verschiedene Anteile festgelegt, die jeweils ein bestimmtes Ziel mit der Konditionierung erreichen wollen: der präventiven, prognostischen und reaktiven Konditionierung. Abbildung 11 stellt das Konzept des virtuellen Schmierkopfs schematisch dar, dessen drei Konditionieranteile im folgenden Abschnitt genauer beschrieben werden.

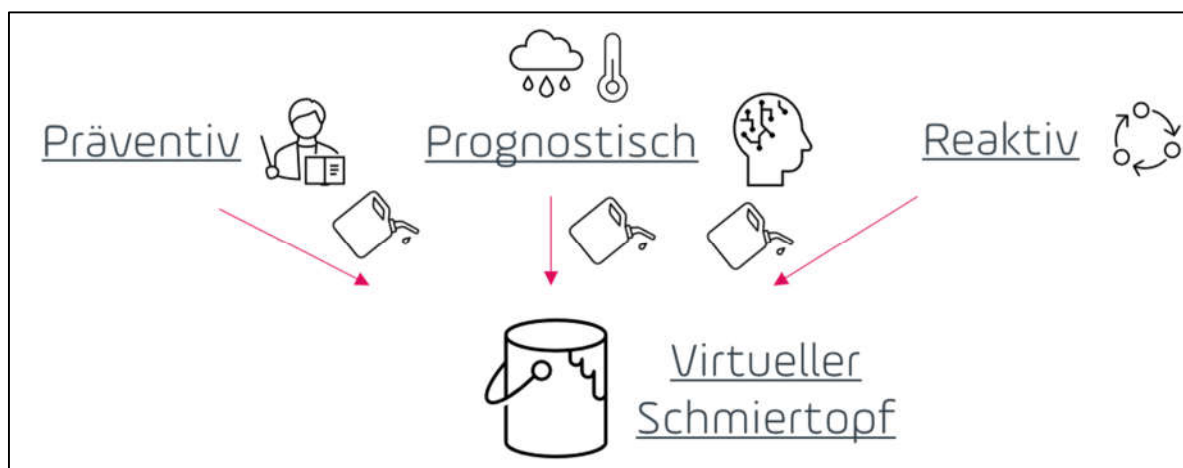


Abbildung 11: Schema der Füllung des virtuellen Schmierkopfs

4.4.1 Präventive Konditionierung

Die präventive Konditionierung stellt neben der Bestätigung der Lärm-Hotspots eine weitere Eingriffsmöglichkeit des Betreibers dar. Der Betreiber kann die vom System vorgeschlagene Grundkonditionierrate ändern, in dem er diese beispielsweise so erhöht, dass jede den ausgewählten Lärm-Hotspot erreichende Strassenbahn eine Konditionierung auslöst. Auf diese Weise wird eine hohe Konditionierdichte erreicht, die unabhängig von den Wetterbedingungen

oder anderen äusseren Bedingungen aktiv ist. Dies ist insbesondere in lärmsensitiven Streckenabschnitten sinnvoll, da eine Lärmentwicklung in Form von Kurvenquietschen unterdrückt wird. Ebenso können dadurch stationäre Schmieranlagen bezüglich der Wirkung einer Schienenkopfkonditionierung ersetzt werden. In diesem Kontext sei erwähnt, dass die stationären Schmieranlagen auch den Spurkranz und die Schienenflanke schmieren und beim Abschalten der stationären Einrichtungen der diesbezüglich ausbleibende Anteil an der Spurkranzschmierung zu berücksichtigen ist.

4.4.2 Prognostische Konditionierung

Die prognostische Konditionierung stellt analog zur präventiven Konditionierung eine Herangehensweise dar, die Lärmstehung verhindert, bevor diese tatsächlich auftritt. Im Gegensatz zur präventiven Konditionierung werden bei der prognostischen Konditionierung die Wetterbedingungen und Umweltbedingungen berücksichtigt. So wird bei Niederschlag die Konditionierermittelmenge deutlich reduziert, wohingegen bei abtrocknenden Schienen die Menge wieder erhöht wird. Die Untersuchung und Potenzialermittlung einer prognostischen Konditionierung mittels künstlicher Intelligenz stellt den Schwerpunkt in diesem Projekt dar.

Die in Form des QI gemessenen und verorteten Lärmereignisse (Kurvenquietschen) werden mit verorteten, meteorologischen Daten synchronisiert. In diesem Kontext werden von einem meteorologischen Dienst [10] Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit im Raum Bern bezogen und auf die Position des jeweiligen Trams bzw. der Linie projiziert.

Wie später in Abschnitt 5.1 genauer erläutert wird, ist insbesondere die Niederschlagsmenge der relevante Parameter, welcher die prognostische Konditionierung beeinflusst.

4.4.3 Reaktive Konditionierung

Die reaktive Konditionierung stellt eine der präventiven und prognostischen Konditionierung überlagerte Regelung dar, die sowohl als Systembackup und als Kontrollmechanismus dient. Sollte aufgrund unzureichender präventiver oder prognostischer Konditionierung ein Lärmereignis an einem bestätigten Lärm-Hotspot registriert werden, wird der Bedarf im virtuellen Schmiertopf derart erhöht, dass die nächstfolgende Strassenbahn an der entsprechenden Stelle eine Konditionierung auslöst. Auf diese Weise wird eine Lärmbelastung über eine längere Dauer verhindert, wenn die präventive und prognostische Konditionierung unzureichend oder fehlerhaft ist.

Die reaktive Konditionierung wird zudem als Kontrollfunktion des Systems verwendet. In diesem Kontext wird der Anteil der reaktiven Konditionierung für jeden Lärm-Hotspot überwacht. Wird der reaktive Anteil der Konditionierung an einem Lärm-Hotspot sehr häufig vom System aktiviert liegt entweder keine präventive Konditionierung vor, die prognostische Konditionierung funktioniert nicht fehlerfrei oder die Schmieranlage ist defekt (z.B. verstopfte Düse). Im Umkehrschluss weist das vollständige Ausbleiben über einen längeren Zeitraum auf eine Überschmierung hin, die durch den präventiven Eingriff des Betreibers oder eine zu hohe vom System berechnete Grundkonditioniererrate verursacht wird. Zielbild ist eine punktuelle Aktivierung der reaktiven Konditionierung an jedem Lärm-Hotspot, um bei einer minimalen Lärmbelastung eine Überschmierung zu verhindern.

4.5 Dynamischen Konditioniererrate

Der in jedem virtuellen Schmiertopf vorhandene Füllstand bildet den Konditionierbedarf an den einzelnen Lärm-Hotspots ab und ist Abbildung 12 in Rot beispielhaft über einen halben Tag dargestellt. Der treppenförmig ansteigende Bereich stellt die für diesen Lärm-Hotspot ermittelte Grundkonditioniererrate dar. Wenn der Füllstand den Wert 1 übersteigt, wird die nächste den Lärm-

Hotspot erreichende Strassenbahn eine Konditionierung auslösen, wodurch der Füllstand um einen bestimmten Betrag reduziert wird – dargestellt durch den orangenen Pfeil. Das treppenförmige Muster ergibt sich durch Aktualisierung des Füllstands alle 5 Minuten. Die Strassenbahnen tauschen in diesem Kontext alle 5 Minuten Informationen bezüglich des in Abschnitt 4.4 beschriebenen jeweiligen aktuellen Füllstands und von der jeweiligen Strassenbahn erfolgten Konditionierung aus. Die Aktualisierung alle fünf Minuten ist für die PoC-Strecke ausreichend, kann aber dazu führen, dass zwei aufeinander folgende Trams konditionieren, wie in Abbildung 12 erkennbar kurz vor 12 Uhr geschehen. Eine kürzere Taktdauer der Aktualisierung ist technisch ohne Probleme möglich und wird beim Betrieb anderer Strecken mit kürzerer Tramfolge, wie z.B. am Hauptbahnhof, neu eingestellt. Im vorliegenden Fall ist die Grundkonditioniertrate konstant, was aus der konstanten Steigung anhand des Winkels α erkennbar ist. Dies bedeutet, dass allein die Grundschierrate den Bedarf regelt und sich kein präventiver, prognostischer oder reaktiver Anteil bemerkbar macht. Ein präventiver Anteil mit der Absicht einer Konditionierung bei jeder Überfahrt würde sich durch einen permanenten Füllstandswert grösser 1 bemerkbar machen. Der prognostische Anteil würde dazu führen, dass sich der Winkel α verringert und temporär (z.B. bei Regen) eine niedrigere Konditioniertrate vorliegt. Eine Aktivierung des reaktiven Anteils wäre durch einen Sprung des Füllstands um den Wert 1 erkenntlich.

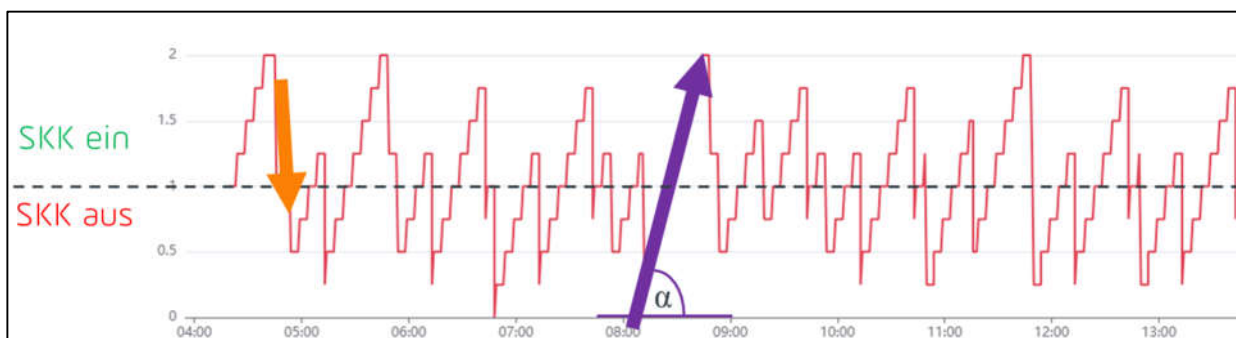


Abbildung 12: Variabler Füllstand eines virtuellen Schmiertopfs eines Lärm-Hotspots über einen halben Tag

Die drei Anteile bauen in der aufgeführten Reihenfolge aufeinander auf. Bei aktivierter präventiver Konditionierung wird die Konditioniertrate derart hoch gewählt, dass der prognostische und reaktive Anteil ohne Wirkung bleiben und bei jeder Überfahrt konditioniert wird. Dementsprechend hat der prognostische Anteil Einfluss, wenn an dem Lärm-Hotspot kein oder nur ein geringer präventiver Anteil vorliegt. Der reaktive Anteil greift unabhängig vom präventiven oder prognostischen Anteil bei einem registrierten Lärmereignis ein. Kommt es zu häufigen reaktiven Eingriffen, obwohl der Wert des Füllstands grösser als 1 ist, kann es sein, dass betrieblich zu wenig Fahrzeuge mit ausgerüsteter i-SKK im Umlauf sind.

5 Ergebnisse

5.1 Untersuchte Einflussfaktoren auf das Kurvenquietschen

Beim Training von Maschine Learning (ML) Modellen wird eine Konfusionsmatrix erstellt, die Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern und dem QI aufzeigt. Die vollständige Konfusionsmatrix ist in Anhang A aufgeführt. Der relevante Auszug der im Anhang schwer lesbaren Konfusionsmatrix wird in Abbildung 13 und Abbildung 14 aufgeführt. Ein dargestellter Punkt entspricht einem gemessenen Lärmereignis hinsichtlich dem Kurvenquietschen, wobei anhand der Höhe des QI auf die energetische Intensität des Lärmereignisses geschlossen werden kann. Vereinfacht beschrieben bedeutet ein höherer QI ein lauterer Kurvenquietschen. Der QI wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur bis zum Wert 150 dargestellt, wobei alle Werte oberhalb 150 auf 150 reduziert wurden. Dies erklärt, wieso in den Abbildungen zahlreiche Lärmereignisse beim Wert 150 dargestellt werden. Ein QI von 50 entspricht einem Lärmereignis von 110 etwa dB(A), wobei aufgrund der logarithmischen Dezibel Skala ein höherer QI nicht signifikant lauter wahrgenommen wird.

Die Interpretation der Konfusionsmatrix muss unter Berücksichtigung der statistischen Häufigkeitsverteilung des jeweiligen Parameters erfolgen. Als Beispiel wird in diesem Kontext die Korrelation zwischen der Temperatur und dem QI, dargestellt auf der linken Seite von Abbildung 13, herangezogen. Es werden bei Temperaturen über 25 °C nur wenige hohe Lärmereignisse ausgewiesen. Dies kann, zumindest teilweise, über die ausgewertete Datengrundlage erklärt werden, die von Anhang Dezember 2024 (Tag 334) bis Ende Juni 2025 (Tag 180) reicht (siehe 4. Grafik von links in Abbildung 14). Im hier betrachteten Aufzeichnungszeitraum sind die warmen Sommermonate Juli, August und September nicht enthalten, weshalb keine statistische Gleichverteilung über den gesamten Temperaturbereich vorliegt. Zur Auswertung werden folglich weniger Bedingungen oberhalb 25 °C herangezogen als in den unteren Temperaturbereichen, wodurch sich die geringere Anzahl an Lärmereignissen oberhalb 25 °C erklären lässt. Die Interpretationseinschränkung gilt für mehrere dargestellten Grafiken in Abbildung 13 (Luftdruck/“pressure“ und Windgeschwindigkeit/“wind speed“) und Abbildung 14 (relative Luftfeuchtigkeit/“humidity“).

Der Niederschlag als Kombination von Regen und Schnee („perception“), dargestellt in der vierten Grafik von links in Abbildung 13, zeigt von allen untersuchten Parametern die stärkste Korrelation mit dem QI. So nehmen die Lärmereignisse oberhalb einer Niederschlagsmenge von 2 mm/h signifikant ab.

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit („speed“) abgebildet in der ersten Grafik von rechts in Abbildung 13 in der Einheit m/s, weist einem typischen Geschwindigkeitsbereich von 5 km/h bis etwa 40 km/h auf, indem Kurven durchfahren werden. In diesem Kontext sind auffällig viele Lärmereignisse bei einer Geschwindigkeit von ca. 12 km/h (≈ 4 m/s) erkennbar. Tatsächlich haben die Vorversuche [2] gezeigt, dass insbesondere bei Fahrgeschwindigkeiten unterhalb 5 km/h die Lautstärke des Kurvenquietschens um ca. 25 dB(A), äquivalent mit einem kleinen QI, stark abnimmt.

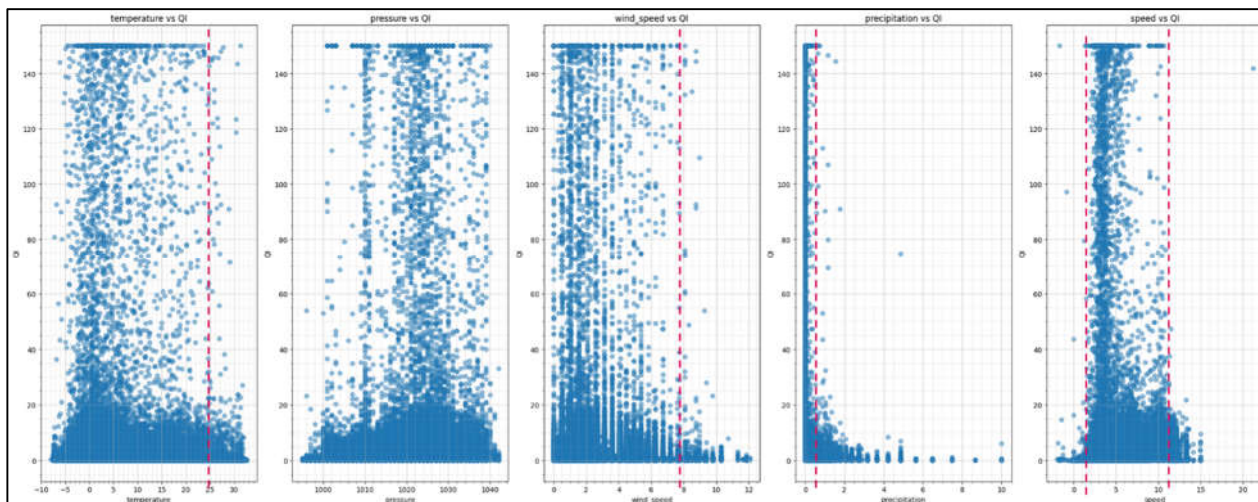


Abbildung 13: erster Auszug aus der Konfusionsmatrix

In der linken Grafik von Abbildung 14 ist die Kurvenkrümmung („curvature“) als Kehrwert des Kurvenradius dargestellt. Es sind kaum Lärmereignisse bei Kurvenkrümmungen unterhalb 0,01, sprich oberhalb 100 m Kurvenradius, erkennbar, was aufgrund des geringeren Anteils an Querschlepp im Rad-Schiene-Kontakt als Anregungsmechanismus des Kurvenquietschens erklärbar ist. Ebenfalls sind keine Lärmereignisse oberhalb einer Krümmung von 0,07 erkennbar, da der minimale Kurvenradius im Streckennetz von Bernmobil begrenzt ist. Die drei ausgeprägten vertikalen Linien, bei einer bestimmten Krümmung (0,39; 0,42 und 0,52) deuten auf drei bestimmte Lärm-Hotspots hin, bei denen sehr häufig Kurvenquietschen auftritt.

Die relative Luftfeuchtigkeit, dargestellt in der zweiten Grafik von links, zeigt so gut wie keine Lärmereignisse unterhalb von 50 %. Die relative Luftfeuchtigkeit ist temperaturabhängig und unterschreitet nur selten 50 %. Da die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Unsicherheiten verbunden ist, muss hier von einigen Fehlmessungen ausgegangen werden, insbesondere bei den wenigen ausgewiesenen Ereignissen unterhalb von 20 %. Es ist eine Anhäufung von Lärmereignissen zwischen 75 % und 85 % erkennbar, wobei es sich, wie bereits erwähnt, um einen statistisch nicht gleichverteilten Parameter handelt. Aus den beschriebenen Gründen wird die relative Luftfeuchtigkeit nicht als Einflussfaktor zur Steuerung der Schienenkopfconditionierung oder als Eingangsparameter in das ML-Modell herangezogen.

Der in der dritten Grafik von links abgebildete Einfluss der Querbeschleunigung, stellt eine Kombination aus Fahrgeschwindigkeit und Kurvenkrümmung dar. Da die Querbeschleunigung mit 5 Hz abgetasteten IMU gemessen wurde, sind die ausgewiesenen Ergebnisse mit Unsicherheiten verbunden. Es ist ersichtlich, dass oberhalb einer Querbeschleunigung von 2,5 m/s² keine Lärmereignisse mehr auftreten, wobei quasistatisch Querbeschleunigungen in diesem Bereich im Betrieb nicht auftreten sollten. Bei genauerer Betrachtung lassen sich die meisten Lärmereignisse in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 m/s² feststellen. Es ist zu erwarten, dass in diesem Querbeschleunigungsbereich in Abhängigkeit der Fahrwerksstellung im Bogen (z.B. Spiessgang) ein Gleitgeschwindigkeitsbereich in Querrichtung vorliegt, der im instabilen Bereich der Kraftschlussfunktion zwischen Rad und Schiene liegt und zu selbsterregten Reibschwingungen führt, die wiederum Kurvenquietschen verursachen (siehe [5]).

Die zweite Grafik von rechts stellt, wie bereits beschrieben, den Betrachtungszeitraum und die damit verbundene Datengrundlage von Anfang Dezember 2024 bis Ende Juni 2025 dar.

Der Tagesverlauf der Lärmereignisse in der ersten Grafik von rechts ist in Abhängigkeit der 86'000 Tagessekunden abgebildet. Die Tagessekunde 0 stellt den Beginn eines Tages um Mitternacht dar.

Innerhalb der Betriebszeiten ist kein ausgeprägtes Muster erkennbar. Die Lärmereignisse verteilen sich dementsprechend nahezu gleichmässig über den ganzen Tag.

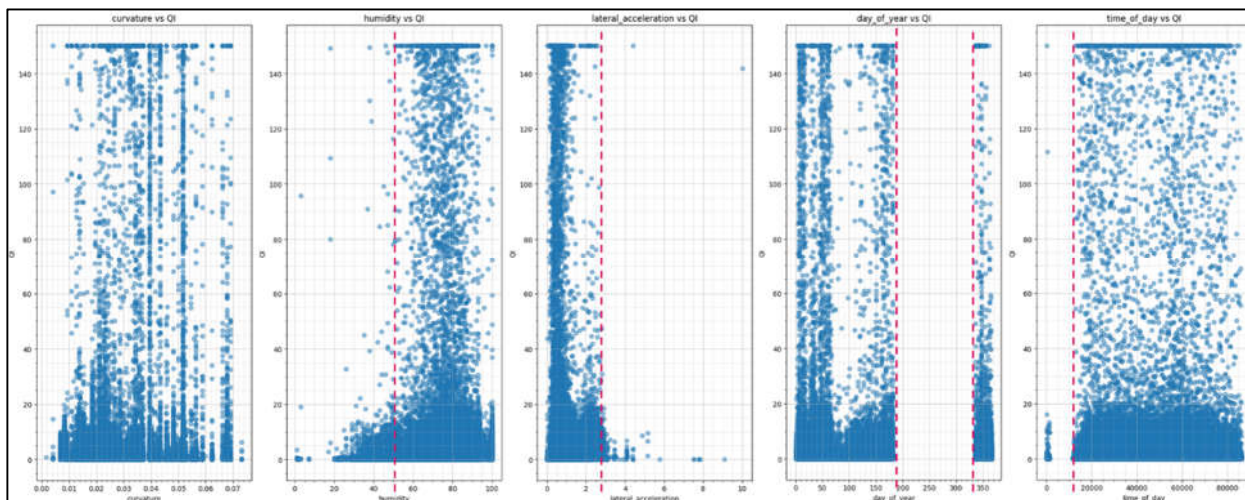


Abbildung 14: zweiter Auszug aus der Konfusionsmatrix

Zusammenfassend kann resümiert werden, dass zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Abschlussberichts im August 2025 die Niederschlagsmenge der einzige relevante Einflussfaktor bezüglich der Lärmstehung durch Kurvenquietschen zu sein scheint. Die Niederschlagsmenge lässt sich gut vorhersagen, da die Wetterprognose alle drei Stunden aktualisiert wird. Dadurch kann das System die Konditionierung gezielt anpassen und bei Regen deutlich Konditioniermittel einsparen.

Nicht auszuschliessen sind saisonale witterungsbedingte Effekte, die aufgrund der nicht vorhandenen Datengrundlage über ein gesamtes Jahr, nicht nachgewiesen werden konnten. In diesem Zusammenhang wird bei einer ganzjährigen Betrachtung ein möglicher Einfluss der Temperatur erwartet. Abbildung 15 zeigt den gemessenen und im Allgemeinen bekannten Zusammenhang zwischen der Temperatur und folgenden Parametern:

- relative Luftfeuchtigkeit (links); mit abnehmender relativer Luftfeuchtigkeit bei zunehmender Temperatur
- Jahreszeitlichem Verlauf (mitte); mit zunehmenden Temperaturen hin zur Jahresmitte
- Täglichem Verlauf (rechts); mit zunehmender Temperatur hin zur Tagesmitte

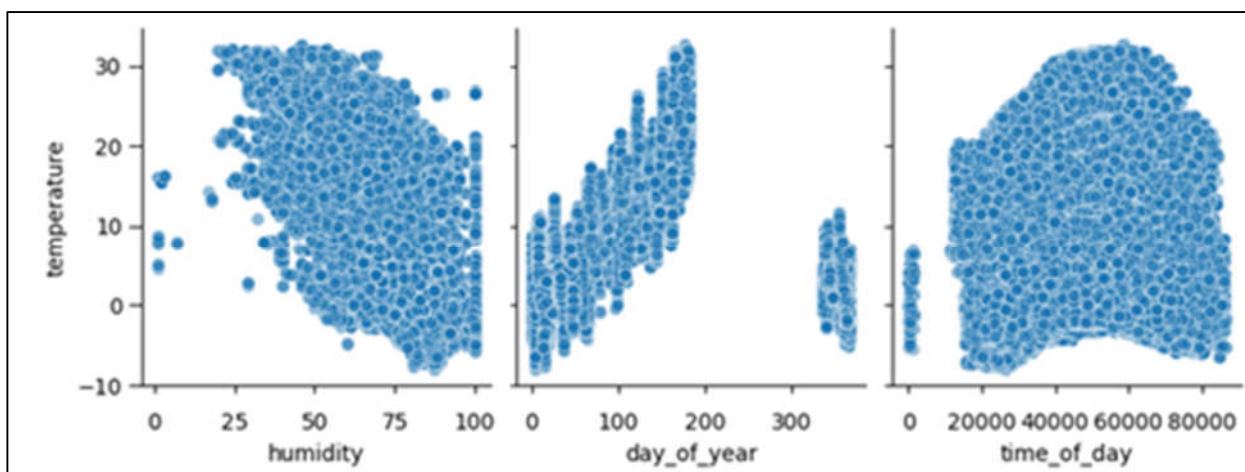


Abbildung 15: Temperaturabhängigkeit einiger Parameter

Ein weiterer Einfluss wird durch die stündliche Sonnenscheindauer erwartet, die in Form des Bewölkungszustandes („cloudiness“) auf der meteorologischen Datenbank zur Verfügung steht und ab Anfang August 2025 gespeichert und bei Fortführung des Projekts weiter untersucht wird.

5.2 Auswahl und Festlegung der PoC-Strecke

Der Proof of Concept (PoC) des i-SKK Systems erfolgt auf einer bestimmten Linie von Bernmobil. Grundsätzlich standen alle Linien als PoC-Strecke zur Diskussion, auf denen die mit Hardware ausgestatteten 15 Fahrzeuge in möglichst hoher Dichte verkehren. Zu Beginn des Projekts 2023 waren dies insbesondere Linie 6 und Linie 7, wobei laufend neue Tramlinks von Stadler ausgeliefert und von Bernmobil in Betrieb genommen wurden. Im Laufe des Projekts kam es aufgrund des Sanierungsbedarfs der Kornhausbrücke zu einer Unterteilung des Bernmobilnetzes, wobei der Ast der Linie 9 von der Haltestelle Kursaal nach Wankdorf vom restlichen Streckennetz abgekoppelt wurde. Auf der Teillinie 9 sind tagesüber fünf Tramlinks ZR im Einsatz und verkehren im 5-Minuten Takt zwischen Kursaal und Wankdorf. Nach Betriebsaufnahme des isolierten Streckenasts zwischen Kursaal und Wankdorf zu Beginn 2025 wurde Bernmobil sehr häufig mit Lärmbeschwerden von Anwohnern konfrontiert, weshalb schnellstmöglich Lärminderungsmaßnahmen erforderlich waren. Aus den beschriebenen Gründen wurde der isolierte Streckenabschnitt zwischen Kursaal und Wankdorf als PoC-Strecke ausgewählt.

Abbildung 16 zeigt das gesamte Streckennetz von Bernmobil mit den jeweiligen Endhaltestellen mit der PoC-Strecke in Blau markiert.

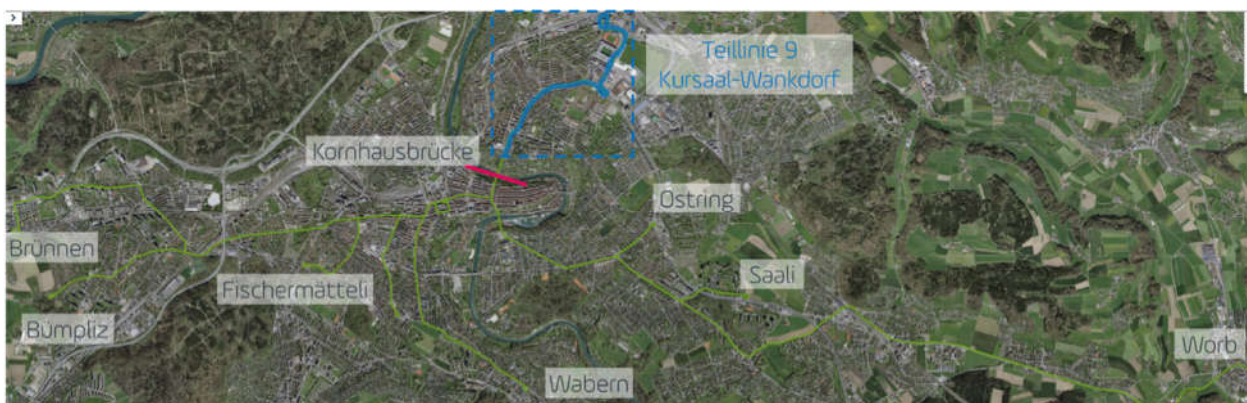


Abbildung 16: PoC-Strecke Teillinie 9 Kursaal-Wankdorf

5.3 Übersicht Messung auf der PoC-Strecke

Daten bezüglich Messungen auf der PoC-Strecke	
Strecke	Kursaal - Wankdorf: Teillinie 9
Anzahl Fahrzeuge	5
Fahrzeugtyp	Tramlink
Radtyp	UltraS
Messdauer	17.02.25 - 30.06.25 (133 Tage)
i-SKK aktiv seit	04.03.25; 11 Uhr Zeitzone UTC
Anzahl verwendete Mikrophone	15 (5*3)
Datenmenge auf PoC-Strecke	1 TB (999,46 GB)
Anzahl Messungen auf PoC-Strecke	136'171
Anzahl Messdateien	1'234'461
Durchschnittlicher Datenupload pro Fahrzeug und Monat	77 GB
Anzahl GPS-SKK Punkte	11
Ausgelöste Konditionierbefehle	47'200
Verwendete Konditioniermittelmenge	47,2 l
Temperaturbereich	-9 °C bis +34 °C
Tage mit Niederschlag	60
Tage unter 0°C	25
Tage über 25°C	35
Tage mit Schneefall	0

Tabelle 2: Zusammenfassung Daten PoC-Strecke

5.4 Lärmreduktion

Zur Beurteilung der Lärmreduktion wird die von einer Strassenbahn gemessene Lärmbelastung in Form des QI über einen Zeitraum von 9 Tagen ausgewertet. Bei dieser Strassenbahn handelt es sich um eine der fünf auf der PoC-Strecke verkehrenden Tramlink ZR mit UltraS-Räder, die im Beobachtungszeitraum jeden Tag eine vergleichbare Zeit in Betrieb war. In diesem Kontext sei erwähnt, dass sich die Tramlink ZR mit UltraS-Rädern bezüglich der ermittelten Lärmbelastung kaum unterschieden haben und somit das dargestellte Strassenbahn als repräsentativ angesehen werden kann.

Abbildung 17 zeigt die von dieser Strassenbahn aufgezeichneten Lärmereignisse in Form des QI über einen Zeitraum von 9 Tagen. Wie später in Abbildung 18 gezeigt wird, lagen im Beobachtungszeitraum konstant trockene Witterungsverhältnisse vor, die einen Vergleich verschiedener Tage zulassen. Auf der linken Seite von Abbildung 17 ist ein „Lärmtag“ als Illustration mit einer rot gepunkteten Linie umrahmt. Die blauen Linien zeigen jeweils registrierte Lärmereignisse an, wobei die orangenen Kreuze den jeweils maximalen QI markieren. Ein Lärmereignis wird registriert, wenn der QI den Wert 5 überschreitet. Die QI wurden in dieser Abbildung aus Gründen der Übersichtlichkeit nur bis zum Wert 50 dargestellt.

Die intelligente Schienenkopfkonditionierung wurde am fünften Tag des Beobachtungszeitraums (04. März 2025) um 11 Uhr (UTC) eingeschaltet. Dieser Zeitpunkt ist durch eine vertikale, rot gestrichelte Linie in der Mitte der Abbildung gekennzeichnet. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den 4,5 Tagen vor und nach der Aktivierung der i-SKK erkennbar. Im Zeitraum vor der Aktivierung wurden 716 Lärmereignisse der einen Strassenbahn registriert. Nach der Aktivierung wurden in den restlichen 4,5 Tagen noch 56 Lärmereignisse registriert, wobei davon 30 Lärmereignisse auf Streckenabschnitte mit stationären Schmieranlagen zurückgeführt werden

konnten, die von der mobilen Konditionierung ausgenommen wurden. Eine quantifizierte Auswertung, welche die Höhe der QI aller Lärmereignisse berücksichtigt, führt auf eine Lärmreduktion von 98,5 % im Beobachtungszeitraum.

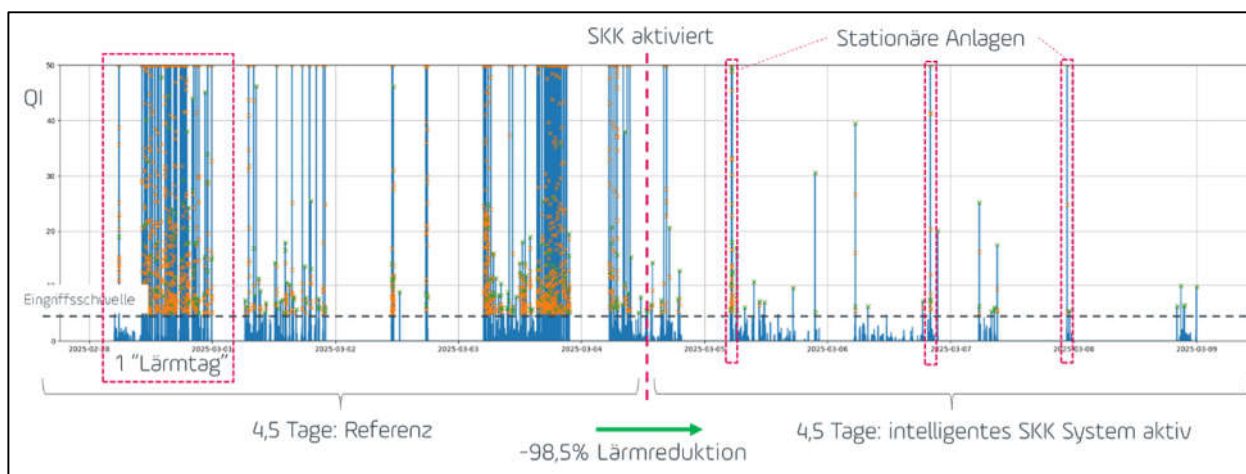


Abbildung 17: Lärmentwicklung vor und nach Aktivierung der i-SKK

Abbildung 18 stellt denselben Zeitraum wie Abbildung 17, vom 28.02.25 bis 09.03.25 in anderer Art und Weise dar. Der QI wird farblich markiert dargestellt, wobei die Farbe Blau kein Kurvenquietschen und die Farbe Rot lautes Kurvenquietschen symbolisiert. In einer Zeile wird der maximale QI über eine Zeitdauer von 4 h aggregiert und dargestellt.

Die Abszisse stellt den geographischen Bezug zur Linie über eine Länge von 3000 m in der Fahrtrichtung von Wankdorf zum Kursaal dar. Auf der Ordinate ist der Zeitstrahl über den Beobachtungszeitraum aufgetragen. Vertikale Linien stellen demzufolge die zeitliche Entwicklung des Kurvenquietschens an einer bestimmten Stelle bzw. Kurve auf der Strecke in Fahrtrichtung von Wankdorf nach Kursaal dar. Es ist gut erkennbar, dass nach Aktivierung der i-SKK die lauten Lärmereignisse oberhalb der roten Linie deutlich abnehmen.

Unterhalb der Abbildung ist in blau die Kurvenkrümmung und in rot die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit geographisch bezogen abgebildet. Die orangenen Kreuze markieren die Position von stationären Anlagen.

Auf der linken Seite der Abbildung sind die meteorologischen zeitbezogenen Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass im Beobachtungszeitraum kein Niederschlag vorhanden war. Am Ende des 9. März ist ein einsetzender Regenschauer als blauen Balken zu erkennen, der zu einer Änderung der Wetterverhältnisse führt, die keine Verlängerung des Beobachtungszeitraums mehr zulässt, da der Niederschlag zu nicht mehr vergleichbaren Randbedingungen hinsichtlich des Rad-Schiene-Kraftschlusses führt. Der Temperaturverlauf lässt erkennen, dass, abgesehen von den ersten beiden Tagen, die Temperatur nachts um den Gefrierpunkt und tagsüber zwischen 12 °C und 16 °C erreicht hat. Die relative Luftfeuchtigkeit zeigt, wie anhand von Abbildung 15 bereits diskutiert, ein diametrales Verhalten zur Temperatur.

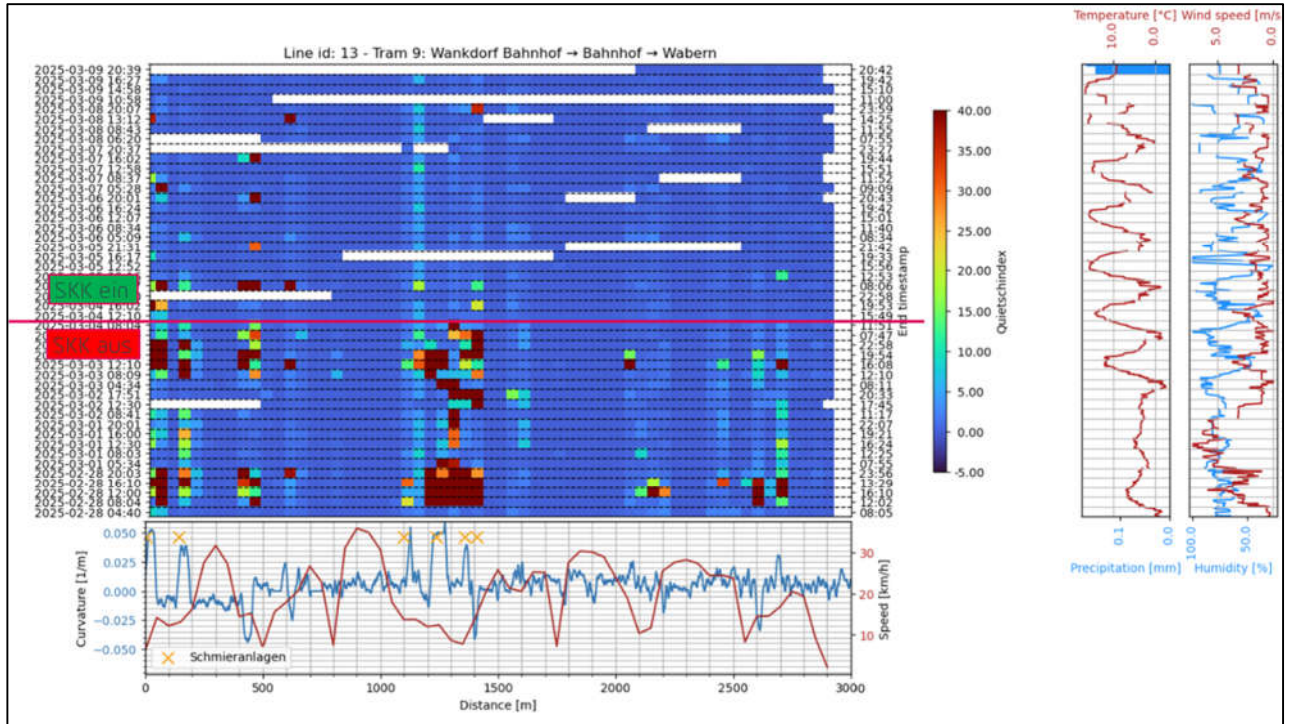


Abbildung 18: geographische verortete Lärmentwicklung über 9 Tage auf der PoC-Strecke

Abbildung 19 zeigt, die auf der PoC-Strecke identifizierten und bestätigten Konditionierpunkte. Zwischenzeitlich wird punktuell auch an den stationären Anlagen mobil konditioniert, um eine Lärmentstehung durch Kurvenquietschen zu unterbinden.

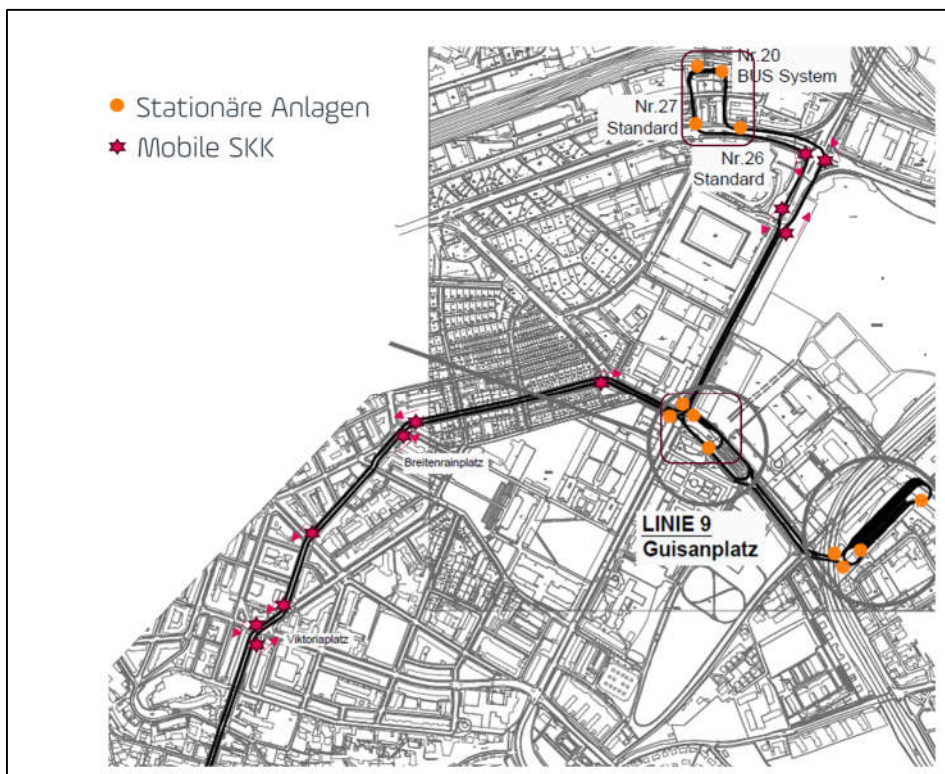


Abbildung 19: Schmierpunkte auf PoC-Strecke

5.5 Verschleissreduktion

Zur Berechnung des Verschleisses wird ein Mehrkörpersystem (MKS) Simulationsmodell des Tramlink mit Ultra-S-Rädern in der Simulationsumgebung SIMPACK erstellt. Die Streckengeometrie der PoC-Strecke wird vollständig modelliert und das entsprechende Geschwindigkeitsprofil nach Bernmobilvorgaben generiert. Als Beladungszustand wird das Leergewicht (Tara) angenommen, um eine konservative Bewertung der Reibarbeit im Rad-Schiene-Kontakt zu ermöglichen. Abbildung 20 zeigt unten eine Illustration des MKS-Modells, oben links den Verlauf der Streckengeometrie und oben rechts das Geschwindigkeitsprofil in einer Fahrtrichtung. Die Antriebsmomente der Fahrmotoren werden derart geregelt, dass das Geschwindigkeitsprofil erreicht wird.

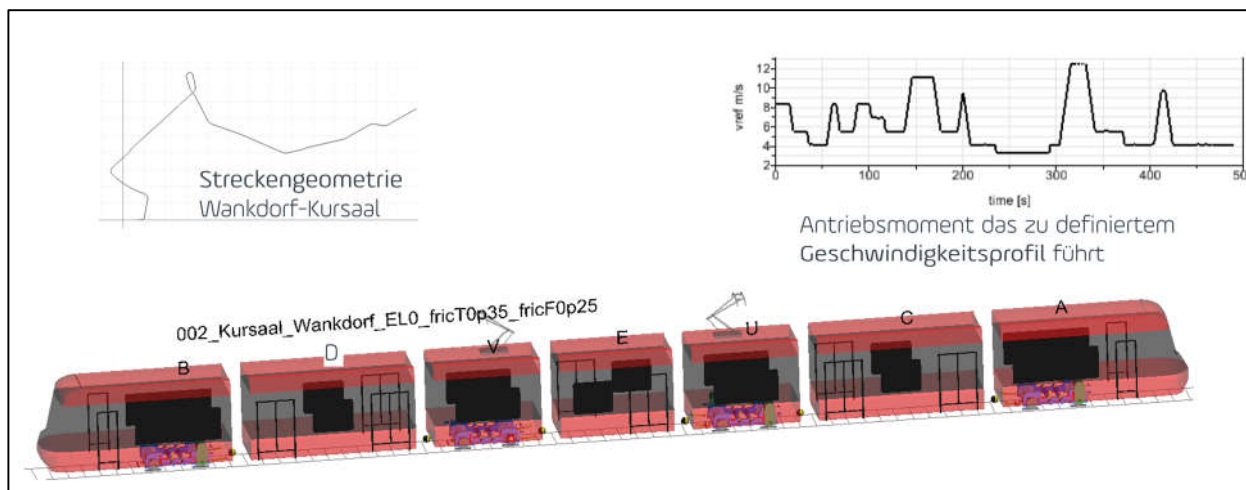


Abbildung 20: MKS-Simulationsmodell

Ausserdem werden, wie in Abbildung 2 dargestellt, die Neuprofile von Rad- und Schiene verwendet, die auch in der Realität zum Einsatz kommen. Für die Verschleissberechnung wird zwischen den beiden möglichen Kontaktpunkten unterschieden:

- 1. Kontaktpunkt zwischen Radlauffläche und Schienenkopf (Fahrfläche), dessen Reibeigenschaften durch die SKK beeinflusst werden kann
- 2. Kontaktpunkt zwischen Spurkranz und Schienenflanke, der zusätzlich zum anderen Kontaktpunkt in Kurven auftritt und dessen Reibeigenschaften durch die SKS beeinflusst werden kann

Der Verschleiss wird separat für beide Kontaktpunkte berechnet. Grundlage ist die Reibarbeit „ T_γ “, welche durch folgende Formel unter Vernachlässigung des Bohrschlupfs beschrieben wird:

$$T_\gamma = Q\mu_x s_x + Q\mu_y s_y$$

Q steht für die Radaufstandskraft, μ für den Kraftschlusskoeffizient in Längs- (x) und Querrichtung (y), sowie die entsprechenden Schlupfanteile in den jeweiligen Bewegungsrichtungen. Die Simulation berechnet basierend auf der genannten Formel unter Berücksichtigung der sich dynamisch ergebenden Radaufstandskräfte (Q) und Schlüpfe (s) die Reibarbeit zwischen Rad und Schiene für jeden Kontaktpunkt für den vorgegebenen Kraftschlusskoeffizienten. Die Reibarbeit kann als die mechanische Arbeit bzw. Energie interpretiert werden, die im Kontaktpunkt zu Verschleiss von Rad und Schiene führt.

Für jedes der definierten Betriebszenarien wurde eine Simulation durchgeführt, bestehend aus einem vollständigen Umlauf in beide Fahrtrichtungen des Zweirichtungsfahrzeugs. Dabei führt im ersten Umlauf Wagen A die Strecke Kursaal–Wankdorf-Kursaal, bevor im zweiten Umlauf Wagen B vorlaufend ist. Die Gesamtfahrstrecke beträgt ca. 12 km. Im Fokus der Analyse steht die Reibarbeit

im Rad-Schiene-Kontakt, die als zentrales Berechnungskriterium herangezogen wurde. Diese ergibt sich aus physikalischen Parametern wie Normalkraft, Reibbeiwert und Schlupf.

Die Berechnungen konzentrieren sich auf den Kontaktpunkt in der Lauffläche, da dieser durch die mobile Schienenkopfkonditionierung (SKK) gezielt beeinflusst werden kann. Der Vergleich der Reibarbeiten über die verschiedenen Szenarien ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Verschleisspotenziale unter variierenden Betriebsbedingungen.

Abbildung 21 stellt exemplarischen die Ergebnisse eines Simulationslaufs für die Fahrt von Wankdorf zum Kursaal dar. Es werden die beiden Kontaktpunkte der beiden Räder der vorlaufenden Achse gezeigt. In Schwarz ist der 1. Kontaktpunkt in der Lauffläche und in Rot der 2. Kontaktpunkt des Spurkranzes abgebildet. Die oberen beiden Grafiken zeigen die Reibkräfte für die jeweiligen Kontaktpunkte in Abhängigkeit der Zeit, die unteren beiden Grafiken zeigen die jeweilige Reibarbeit, die sich über eine Umrechnung von Schlupf in Gleitgeschwindigkeit und entsprechender Integration über die Zeit ergibt. Der Maximalwert der Reibarbeit am Ende der Simulation entspricht der Energie, die während der durchgeführten Simulation im jeweiligen Kontaktpunkt erzeugt wurde und zu Verschleiss führt.

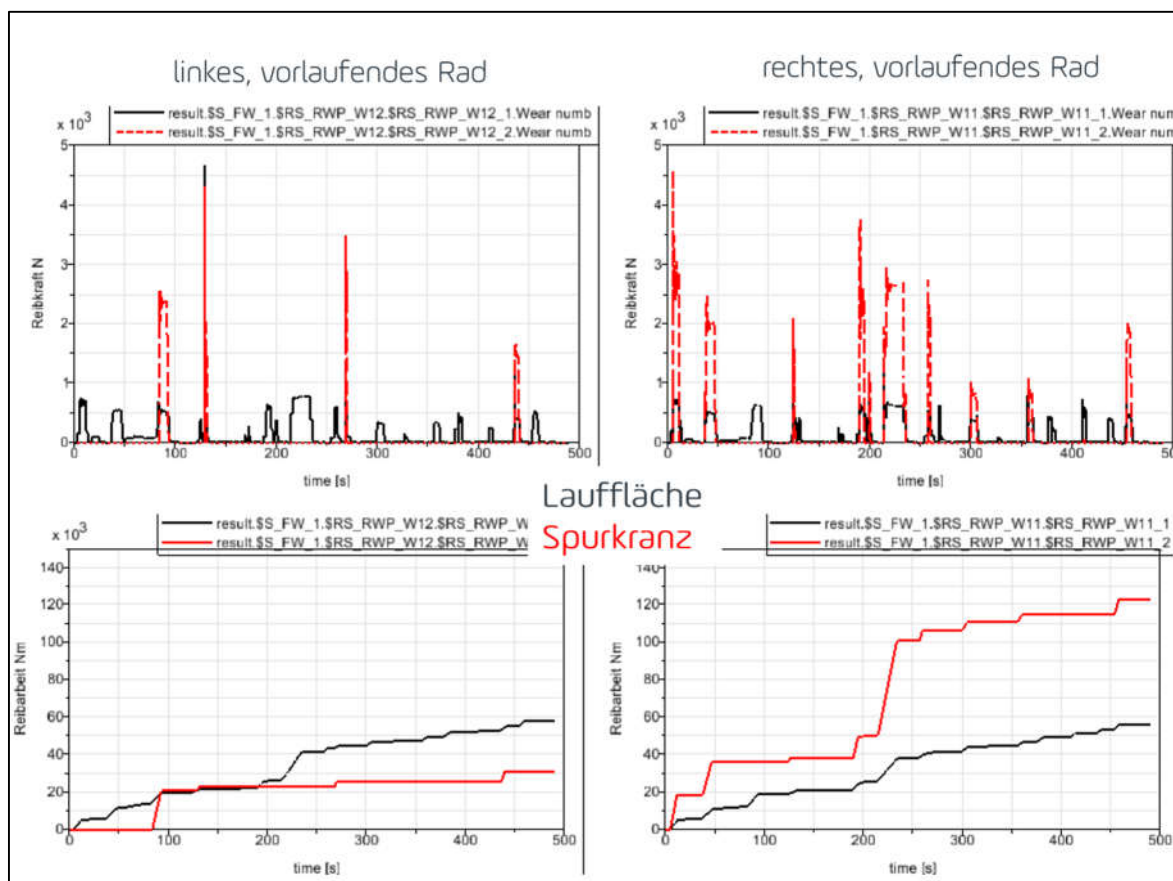


Abbildung 21: Reibkräfte und Reibarbeiten der beiden Kontaktpunkte der vorlaufenden Achse

Grundsätzlich ist in Abbildung 21 anhand der Reibarbeit von knapp 60'000 Nm zu erkennen, dass in jeder Kurve im 1. Kontaktpunkt ähnlich viel Reibarbeit bei linkem und rechtem Rad umgesetzt wird. Abgesehen von der 180° Kurve am Guisanplatz nach 220 s verhalten sich alle Kurven ebenso sehr ähnlich, was anhand eines nahezu konstanten Anstieges der Reibarbeit der 1. Kontaktpunkte in Schwarz ersichtlich ist. Diese Betrachtung lässt darauf schliessen, dass bei Strassenbahnen eine beidseitige Schienenkopfkonditionierung an nahezu allen Kurven relevant für die Reduktion des Laufflächenverschleisses ist.

Der in Rot dargestellte Spurkranzkontakt und der damit verbundene Verschleiss verhält sich stark unterschiedlich zum 1. Kontaktpunkt. Es ist ein starker Unterschied zwischen linkem und rechtem Rad erkennbar, der durch die Streckengeometrie und deutlich mehr Links- als Rechtskurven zu erklären ist. Ein intensiver Spurkranzkontakt tritt nur in bestimmten Kurven auf, was zu einem jeweils sprunghaften Anstieg der Reibarbeit führt.

Die beschriebene Auswertung wird für alle Räder durchgeführt und eine Gesamtreibarbeit für beide Kontaktpunkte ermittelt. Die Gesamtreibarbeit für den 1. Kontaktpunkt wird in verschiedenen Simulationskonfigurationen berechnet, um diese anschliessend zu vergleichen und die Verschleissreduktion zu bewerten. Die drei verschiedenen Konfigurationen unterscheiden sich um den in der Simulation verwendeten Kraftkoeffizienten des 1. Kontaktpunkts und bilden somit den Einfluss der SKK ab:

1. nicht konditioniertes System ohne mobile SKK an einem sehr trockenen Tag: $\mu = 0.5$
2. teilkonditioniertes System mit Referenz SKK (GPS-gesteuert) an einem trockenen oder bewölkten Tag: $\mu = 0.35$
3. optimal konditioniertes System mit i-SKK an einem sehr trockenen Tag oder nicht konditioniertes System ohne mobile SKK an einem nassen Tag: $\mu = 0.25$

Die erste Konfiguration bildet in der Simulation die Verhältnisse nach, die auf der PoC-Strecke vorliegen, wenn keine SKK aktiv ist und sehr trockenes Wetter vorliegt. In diesem Fall ist ein hoher Kraftschlusskoeffizient zu erwarten ($\mu = 0.5$), der zu hohem Verschleiss führt. Andererseits bildet die dritte Konfiguration die Verhältnisse nach, die bei optimal konditioniertem System mittels i-SKK an einem trockenen Tag zu erwarten sind und zu einem niedrigen Kraftschlusskoeffizienten mit entsprechend geringem Verschleiss führt. Dieselben Kraftschlussverhältnisse sind ebenso bei nassen Witterungsverhältnissen ohne SKK zu erwarten. Die zweite Konfiguration bildet ein mittleres Szenario ab, dass einer Referenz-SKK, ohne Intelligenz zugeordnet werden kann.

Für die Verschleissberechnung müssen nun die drei simulierten Konfigurationen mit den statistisch belegten über das Jahr in Bern vorherrschenden Wetterbedingungen in Einklang gebracht werden. Dadurch wird beispielsweise berücksichtigt, dass bei nassen Schienen an Regentagen der Rad-Schiene-Kontakt natürlich konditioniert ist und eine aktive SKK wirkungslos bleibt und unnötig Konditioniermittel verbraucht wird. Des Weiteren liegen sehr trockene Tage nur etwa über ein Drittel des Jahres vor, an denen die Wirkungsweise einer SKK maximal ausgenutzt werden kann. Grundsätzlich werden für die Betrachtung folgende Annahmen getroffen:

- Die stationären Anlagen funktionieren ideal ($\mu = 0.25$)
- Die intelligente, mobile i-SKK funktioniert ideal ($\mu = 0.25$)
- Nasse und konditionierte Verhältnisse sind identisch ($\mu = 0.25$)
- Wetterbedingungen (Jahresbetrachtung)
 - 1/3 sehr trockene Tage ($\mu = 0.5$)
 - 1/3 gemischte Tage ($\mu = 0.35$)
 - 1/3 nasse Tage ($\mu = 0.25$)

Die beschriebenen Zusammenhänge führen zu drei Szenarien, die in Abbildung 22 miteinander verglichen werden:

- Szenario ohne Konditionierung, sprich keine stationären Anlagen und keine mobile SKK
- Szenario mit ideal funktionierenden stationären Anlagen und sehr geringer bzw. keiner SKK

- Szenario mit optimaler Konditionierung durch mobile i-SKK und stationäre Anlagen

	Ohne Konditionierung	Ist-Situation (Referenz)	Intelligente SKK
Schmierzustände	<ul style="list-style-type: none"> • ohne stat. Anlagen • ohne mobile SKK • mobile SKS (alle 180 s) 	<ul style="list-style-type: none"> • stat. Anlagen ideal ($\mu = 0.25/0.1$) • ohne mobile SKK • mobile SKS (180 s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Intelligente Konditionierstellen
		<p>+12% Reibarbeit +12% Radlaufflächenverschleiss</p>	<p>-12% Reibarbeit -12% Radlaufflächenverschleiss</p>

Abbildung 22: Verschleisseinfluss unterschiedlicher Schmiersysteme

Die Auswertung berücksichtigt den witterungsbedingten Verlauf über ein ganzes Jahr. Eine mobile i-SKK zeigt hinsichtlich der Reduktion des Laufflächenverschleisses ein Potenzial von 12 % gegenüber dem auf der PoC-Strecke aktuell vorliegenden Referenzzustand. Eine vergleichbare Verschleissreduktion wird durch die Szenarien mit und ohne stationäre Anlagen erreicht.

Analog zur Auswertung des 1. Kontaktpunkts wurde der 2. Kontaktpunkt zwischen Spurkranz und Schienenflanke ausgewertet. Hier wurden allerdings andere Kraftschlusskoeffizienten $\mu = 0,35; 0,25$ und $0,1$ in den drei Konfigurationen gewählt. Als Ergebnis wurde ein Einsparungspotenzial rund 9 % bezüglich Schienenflankenverschleiss und 9 % Spurkranzverschleiss durch eine i-SKS im Vergleich zu Referenzsystem mit zeitgesteuerter SKS und stationären Anlagen ermittelt.

5.6 Reduktion Konditionierungsmittel

Die Untersuchung des Einsparpotenzials beim Konditioniermitteleinsatz erfolgt auf Basis eines Vergleichs zweier meteorologisch unterschiedlicher Betriebstage. Analysiert wurden der 24.07.2025, ein typischer Regentag nach Abbildung 23, sowie der 12.08.2025 bei trockenen Bedingungen. Am 24.07.2025 wurde auf der PoC-Strecke ein Konditionierbedarf von 800 Impulsen gemessen, während am 12.08.2025 ein Bedarf von 1000 Impulsen festgestellt wurde. Die Differenz verdeutlicht den Einfluss der Witterung auf den Konditioniermittelverbrauch.

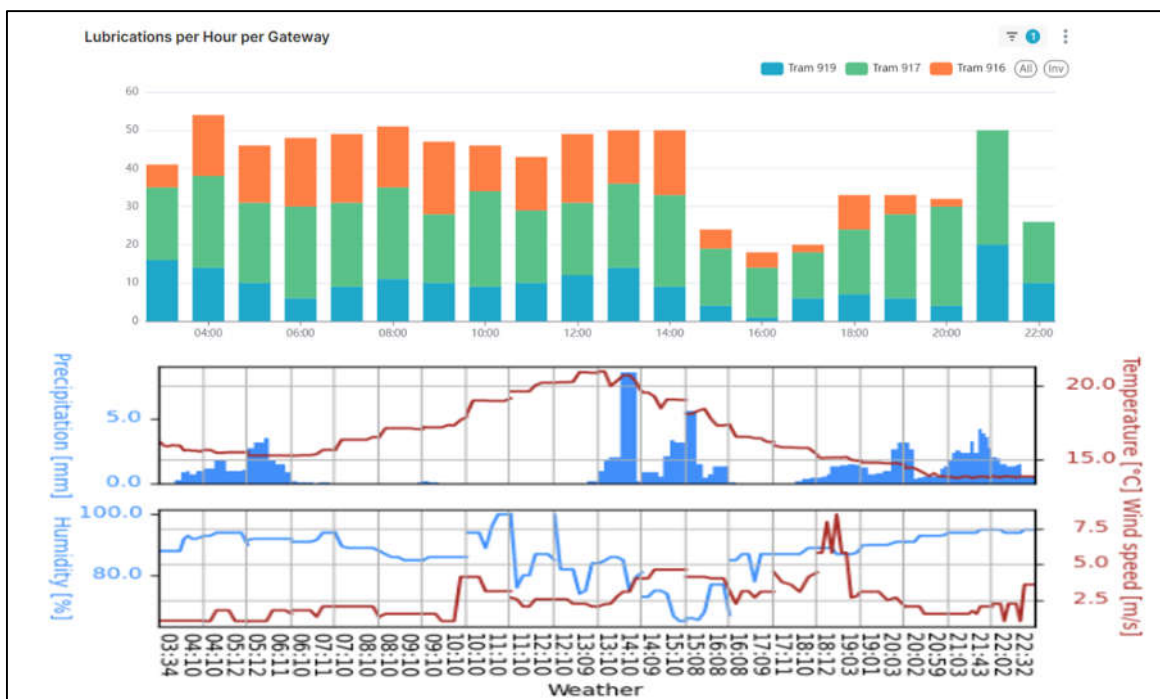


Abbildung 23 Verlauf Konditioniermittelbedarf am 24.7.2025

Für die Jahresbetrachtung wird angenommen, dass gemäss den City Statistics der Stadt Bern [8] durchschnittlich 120 Regentage pro Jahr auftreten, was bei der Hochrechnung des jährlichen Konditioniermittelbedarfs berücksichtigt wird. Auf der PoC-Strecke sind aktuell fünf Fahrzeuge unterwegs, was bedeutet, dass diese Fahrzeuge kontinuierlich an allen vordefinierten Konditionierpunkten unabhängig der meteorologischen Bedingungen konditionieren. Die Messdaten zeigen, dass der Schmierbedarf auf der PoC-Strecke mit einem Drittel der Fahrzeuge gedeckt werden kann. Demzufolge ergibt sich nach Tabelle 3 eine theoretische Konditioniermittlersparnis von 60 % gegenüber einer SKK ohne Intelligenz, bei einer gesetzten Zielvereinbarung von minimalen Lärmemissionen durch Kurvenquietschen.

	Einheit	Ohne intelligente SKK	Mit intelligenter SKK
Fahrzeuge	Stk.	5	2
Konditionierbedarf trockene Tage	Konditionierimpuls	2500	1000
Konditionierbedarf regnerische Tage	Konditionierimpuls	2000	800
Menge pro Konditionierimpuls	ccm	1	1
Konditioniermittelbedarf	Liter	853	341
Konditioniermittelreduktion			-60%

Tabelle 3 Berechnung Konditioniermittelbedarf

5.7 Akustisches Rad-Schiene Kontaktmonitoring

Die bislang durchgeführte Datenanalyse zeigt, basierend auf dem beschriebenen Konzept, weitere mögliche Anwendungsfälle auf, die über das Projektziel hinausgehen und im folgenden Abschnitt kurz beschrieben werden sollen.

5.7.1 Detektion Bedarf Spurkranzschmierung (SKS)

In einer lärmauffälligen Kurve (Bachmätteli Linie 7) konnte der aufgezeichnete Lärm keiner bislang bekannten Quietschfrequenz zugeordnet werden. Dennoch konnte nach Abbildung 24 ein spezifisches Frequenzband zwischen 270 Hz und 350 Hz festgestellt werden, welches im Vergleich zu den Quietschfrequenzen breitbandiger ist und deshalb als eher „kratzendes“ Geräusch wahrgenommen wird.

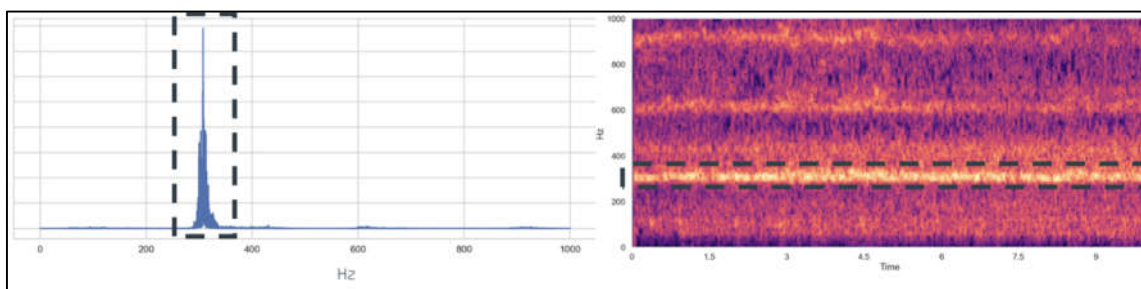


Abbildung 24: Auffälliger Frequenzbereich bei intensivem Spurkranzkontakt und ausbleibender Spurkranzschmierung

Die Besichtigung der entsprechenden Kurve zeigte einen starken Verschleiss der Schienenflanke, der in Abbildung 25 durch den roten gestrichelten Kasten gekennzeichnet ist. Aufgrund der Kontaktgeometrie zwischen Rad und Schiene ist diese Verschleissform mit dem Spurkranzverschleiss am Radkörper in Verbindung zu setzen.

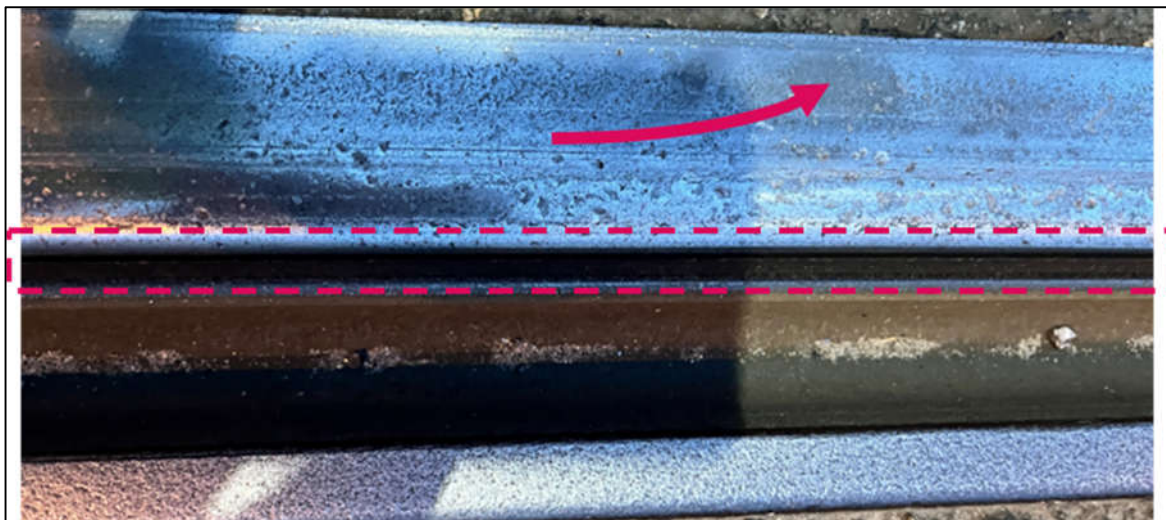


Abbildung 25: Verschleiss die Schienenflanke / Schieneninnenseite in einer akustisch auffälligen Linkskurve

Da an der besagten Stelle in der Kurve vor der Haltestelle Bachmätteli aus Richtung Bümpliz keine stationäre Schmieranlage verbaut ist, könnte hier eine gezielte Betätigung der fahrzeugseitigen Spurkranzschmierung zu einer bedeutsamen Verschleissreduktion von Rad und Schiene führen. Dies könnte zu einer längerer Liegedauer der Schiene und zu einem grösseren Reprofilierungsintervall der Räder führen. Aktuell wird die fahrzeugseitige Spurkranzschmierung periodisch über ein vorgegebenes Zeitintervall unabhängig von den Umweltbedingungen und Position des Fahrzeugs auf dem Streckennetz ausgelöst.

Analog zum aktuellen Projekt der selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung, ist eine selbstlernende Spurkranzschmierung (i-SKS) denkbar, die zu einer massiven Verschleissreduktion führen könnte. Die Detektion des Schmierbedarfs bezüglich der Spurkranzschmierung kann aufgrund der durchgeführten Analyse als abgesichert gesehen werden.

Die vor Ort durchgeführten Messungen zeigen ein unterschiedliches Verhalten zwischen Combino (Losradfahrwerk) und Tramlink (konventioneller Radsatz mit Radsatzwelle): Der Combino weist in dieser Kurve keine akustische Auffälligkeit bezüglich Spurkranzkontakt auf, wohingegen beim Tramlink akustisch ein starker Spurkontakt festgestellt werden kann. Der heterogenen Flottenstruktur durch verschiedenere Fahrzeugtypen sollte aus der Perspektive eines gesamtheitlichen Lösungsansatzes bei einem weiteren Projektverlauf Rechnung getragen werden.

5.7.2 Detektion Riffelbildung

Auf dem Streckennetz von Bernmobil sind zwei Streckenabschnitte bekannt, auf denen es oftmals zu Riffelbildung auf dem Schienenkopf kommt. Dabei handelt es sich um begrünte, kurvenfreie Abschnitte zwischen den Haltestellen «Schöneegg» und «Sandrain» auf Linie 9 und zwischen «Bethlehem Kirche» und «Holenacker» auf Linie 8. Eine Besichtigung des Abschnitts auf Linie 9 zwischen «Schöneegg» und «Sandrain» (siehe Abbildung 26) zeigte eine bereits eingesetzte Riffelbildung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 135$ mm.

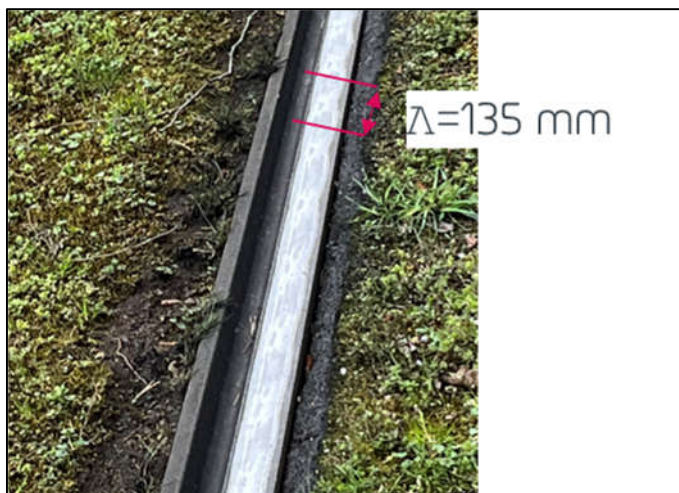


Abbildung 26: Festgestellte Riffelbildung zwischen Schöneegg und Sandrain

Aufgrund der vorliegenden Riffelbildung wurden die akustischen Signale der Fahrzeuge auf der Linie 9 Abschnitt Bahnhof – Wabern analysiert, um die Möglichkeit der Detektion einer Riffelbildung zu untersuchen. Abbildung 27 zeigt das Spektrogramm des aufgezeichneten Mikrophonsignals während des befahrenen Abschnitts von «Schöneegg» nach «Sandrain». Auf der zweiten Y-Achse auf der rechten Seite der Abbildung 27 ist die Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h aufgetragen.

Im Spektrogramm ist in den rot gekennzeichneten Abschnitten, in denen eine Riffelbildung auf der Strecke beobachtet wurde, eine geschwindigkeitsabhängige Frequenz auffällig, welche auf die Schienenriffel hindeutet. Dieses Beispiel zeigt auf, wie mithilfe von akustischen Messungen auf Fahrzeugseite die Infrastruktur überwacht werden kann.

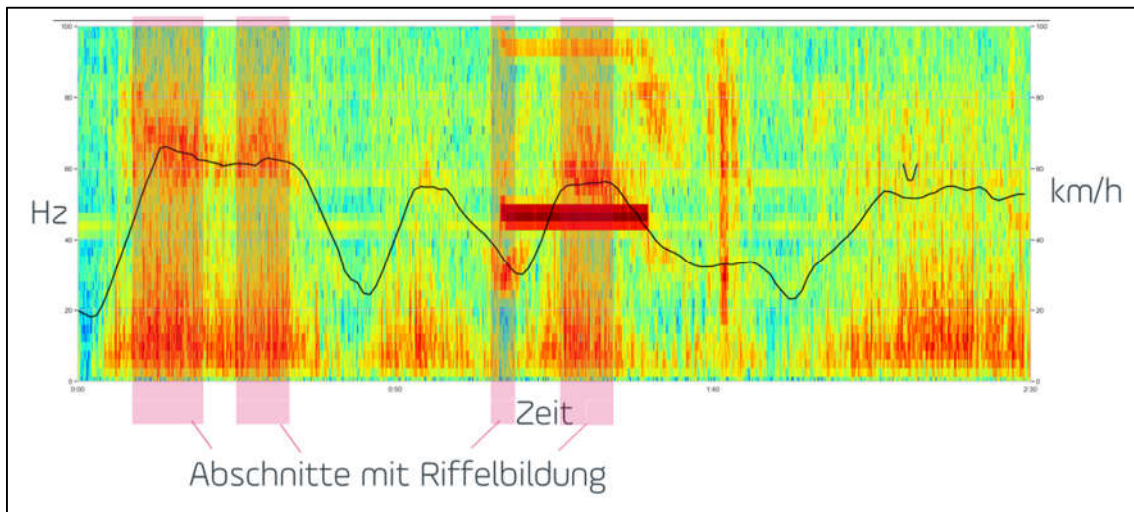


Abbildung 27: Spektrogramm eines Akustiksignals mit überlagerter Fahrgeschwindigkeit

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Auf Basis der Projektenergebnisse wurden die wirtschaftlichen Einflüsse der intelligenten Schienenkopfkonditionierung untersucht. Diese umfassen Lärmkosten, Schmiermittelverbrauch und Verschleissreduktion. Die Betrachtung erfolgte auf der PoC-Strecke. Die Resultate wurden auf dieser Basis auf das gesamte Streckennetz hochgerechnet. In allen Auswertungen wurden nur die Szenarien in der Analyse berücksichtigt, welche tatsächlich durch den intelligenten Systemansatz beeinflussbar sind.

6.1 Bepreisung von Lärminderungsmaßnahmen

Als Grundlage für die Lärmkostenberechnung auf der PoC-Strecke diente die BAV-Richtlinie «Lärmschutz bei Eisenbahnen» vom 15. September 2023 [6]. In dieser wird in Art. 11.1: *(Bei neuen bzw. wesentlichen geänderten Anlagen wird die wirtschaftliche Tragbarkeit gemäss der Publikation des BAFU «Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhältnismässigkeit von Lärmschutzmassnahmen» beurteilt.)* auf die BAFU-Publikation «Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhältnismässigkeit von Lärmschutzmassnahmen» 2006 [7] verwiesen. Auf Seite 10 wird von folgenden Grundlagen für eine Grobabschätzung ausgegangen:

Für Grobabschätzungen und für einfachere Projekte eignet sich auch eine Maximalkostenbetrachtung über das Kriterium:

– Fr. 5'000.– pro dBA Massnahmenwirkung und Einwohner (Fr./dBA * Einwohner).

Zur Ermittlung der Lärmbelastung auf der PoC-Strecke wurde eine detaillierte Analyse der gemessenen Lärmereignisse durchgeführt. Als Referenzfahrzeug diente ein Tramlink mit Ultra-S in einem „trockenen/ungeschmierten“ Zustand, dessen Messdaten über einen Zeitraum von 24 Stunden aufgezeichnet wurden. Dabei wurden Anzahl, Dauer und Amplitude der auftretenden Lärmereignisse mithilfe des Quietschindex (QI) systematisch erfasst und ausgewertet. Für ein Fahrzeug wurde eine gesamt Quietschdauer von knapp 30 s pro Tag gemessen, woraus eine Lärmzunahme von 0,004 dBA über den ganzen Tag ermittelt werden konnte.

Anschliessend erfolgte eine Skalierung der Ergebnisse auf insgesamt fünf Tramlinks, die auf der PoC-Strecke im Einsatz sind. Auf dieser Basis wurde die Tageslärmbelastung in dBA berechnet, wobei eine gleichmäßige Verteilung der Lärmereignisse über den gesamten Tag angenommen wurde. Zusätzlich wurde die Effektivität der eingesetzten Massnahmen zur Lärminderung berücksichtigt, die mit 98,5 % (vgl. Abbildung 17) beziffert wurde.

Für eine realitätsnahe Bewertung der Lärmbelastung wurden zudem die Anzahl der betroffenen Anwohner entlang der PoC-Strecke sowie meteorologische Einflüsse einbezogen, insbesondere die Annahme von 120 nassen Tagen pro Jahr, an denen aufgrund der Nässe reduzierte Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene vorliegen und keine intensiven Lärmereignisse zu erwarten sind.

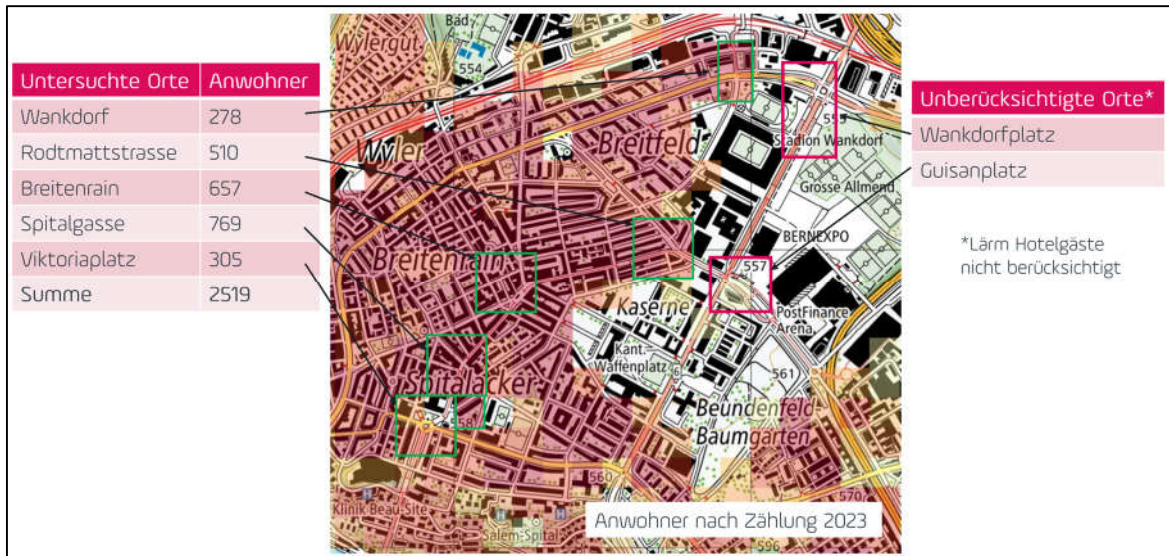


Abbildung 28: Ermittlung von betroffenen Anwohner an zusätzlichen Schmierstellen

Zur umfassenden Bewertung der möglichen Auswirkungen wurden verschiedene Betriebszenarien analysiert:

- Worst-Case-Szenario, das die ungünstigsten anzunehmenden Bedingungen abbildet, indem die maximale Anzahl betroffener Anwohner und eine unterdurchschnittliche Anzahl nasser Tage pro Jahr angenommen werden
- realistisches Szenario, das auf typischen Betriebsdaten mit einer durchschnittlichen Anwohnerverteilung und einer Regenhäufigkeit von 100 Tagen jährlich basiert
- Best-Case-Szenario, das von optimalen Rahmenbedingungen mit einer geringen Anwohnerexposition und nassen Witterungsverhältnisse mit entsprechend wenig Lärmemissionen ausgeht

Faktoren	Worst Case	Realistisch	Best Case	Quelle
Durchschnittliche Lärmbelastung	0,02 dBA	0,02 dBA	0,02 dBA	Messung
Effektivität	0.985	0.985	0.985	Messung
Betroffene Anwohner	2'519	2/3 = 1'679	1/3 = 1'259	Zählung
Regentage pro Jahr	80/365	100/365	120/365	Statistik
Kosten pro dBA und Anwohner	5'000 CHF/dBA	5'000 CHF/dBA	5'000 CHF/dBA	BAV/BAFU
Ergebnis POC-Strecke Kursaal-Wankdorf	193'738 CHF	120'095 CHF	83'273 CHF	

Vereinfachte Extrapolation auf weitere Tramlink-Linien von Bernmobil

Linie 7 (Ostring – Bümpliz) 8 km	516'637 CHF	320'254 CHF	222'063 CHF	POC * 8/3
Linie 6 (Fischermätteli – Muri) 6,5 km	419'767 CHF	260'207 CHF	180'426 CHF	POC * 6,5/3
Linie 9 (Kursaal – Wabern) 4,2 km	271'233 CHF	168'133 CHF	116'582 CHF	POC * 4,2/3
Gesamt	1'401'375 CHF	868'689 CHF	602'344 CHF	

Abbildung 29 Lärmkostenbetrachtung in unterschiedlichen Szenarien

6.2 Einsparungspotenzial durch Schmiermittelreduktion

Die Schmiermittelreduktion beträgt gemäss Abschnitt 5.6 60 % bezüglich des Konditioniermittels der mobilen SKK. Dieser Prozentsatz ist als relatives Einsparungspotenzial von einer Standard-SKK im Auslieferungszustand hin zu einer i-SKK zu verstehen. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind für jeden Betreiber die individuell geltenden Faktoren wie die tatsächlich verbrauchte Menge und den jeweiligen Einkaufspreis des Schmiermittels einzusetzen.

Schätzungsweise beträgt der jährliche Schmiermittelverbrauch von stationären und mobilen Schmiersystemen bei Bernmobil ca. 3000 kg. Bei einem Verkaufspreis von ca. 35 CHF/kg Kosten von über 100'000 CHF, die mithilfe einer intelligenten, bedarfsgerechten Schienenkopfkonditionierung teilweise eingespart werden können.

6.3 Einsparungspotenzial durch Verschleissreduktion

Im Abschnitt 5.5 wurde das Verschleisspotenzial für eine i-SKK gegenüber eine Standard-SKK, sowie einer i-SKS gegenüber einer Standard-SKS berechnet. Die Ergebnisse wurden für eine Strassenbahn mit konventionellen Radsätzen auf der PoC-Strecke berechnet, was bei einer Übertragung auf andere Systeme zu berücksichtigen ist.

- Standard-SKK -> i-SKK: 12 % Reduktion Laufflächenverschleiss
- Standard-SKS -> i-SKS: 9% Reduktion Spurkranzverschleiss und 9% Reduktion Schienenflankenverschleiss

Analog zu Abschnitt 6.2 handelt es sich dabei um relative Prozentangaben. Eine Monetarisierung obliegt dem Betreiber, in dem die individuellen Faktoren einzusetzen sind.

7 Edge Konzept

In der aktuellen Ausführung des Systems generiert jedes Fahrzeug ca. 100 GB an Messdaten pro Monat, welche per LTE-Netzwerk in die Cloud übertragen werden. Diese Datenmenge ist bei den meisten Mobilfunkanbietern mit dem Abschluss eines speziellen Abonnements verbunden, welches nicht zu vernachlässigende monatliche Betriebskosten nach sich zieht (bis zu 100 CHF/Monat und Fahrzeug).

Um diese Kosten zu senken, ist eine Umstellung des Systems auf direkte Vorverarbeitung der Messdaten auf dem Fahrzeug («Edge Verarbeitung») interessant. Damit müssen nicht mehr die datenintensiven Roh-Messdaten, sondern nur noch verarbeitete Dateien in die Cloud übertragen und dort gespeichert werden. Die Vorverarbeitung auf dem Gerät würde die zu übertragende Datenmenge ca. 200-fach reduzieren, womit deutlich günstigere Mobilfunkabonnements zum Einsatz kommen könnten. Gleichzeitig bedeutet die Vorverarbeitung nicht zwingend, dass die Rohdaten nicht mehr übertragen werden können. Zu Test- und Entwicklungszwecken wäre eine selektive Übertragung der Rohdaten immer noch wünschenswert, sofern dies durch die Datenmenge vom Mobilfunkabonnement zugelassen wird.

7.1 Anpassungen Hard- und Software

Im aktuellen System wird die Signalverarbeitung in mehreren Zwischenschritten vollständig zentralisiert in der Azure Cloud durchgeführt. Aufgrund der eingesetzten Technologie (serverless Function App) ist dieser Verarbeitungscode natürlicherweise nur minimal «ortsgebunden» und könnte aus technischer Sicht ebenso auf jedem anderen Server oder, wie bei der Edge Verarbeitung vorgesehen, dezentralisiert direkt auf dem Fahrzeug durchgeführt werden. Die dafür notwendige Rechenleistung ist verhältnismässig gering, die Rechenleistung moderner Single-Board-Computer wie einem [Raspberry Pi 5](#) würde ausreichen, um die Verarbeitung im laufenden Betrieb zu gewährleisten. EN-50155 zertifizierte Rechner sind in der Regel aber deutlich kostspieliger (Preise in der Regel >1'000 CHF) und schlagen so auf die Initialkosten. Falls ein Prozessor mit genügend Leistung und Speicher im Gateway vorliegt, kann die Signalverarbeitung auch direkt im Gateway vorgenommen werden. In diesem Fall muss jedoch die Software-Architektur des Gateways die Verarbeitung unterstützen. Ausserdem muss ein direkter Remotezugriff auf das Gateway möglich sein, um die Verarbeitungslogik ausführen zu können und Aktualisierungen und Anpassungen ohne grossen Aufwand auf den Geräten konfigurierbar sein.

Auf der Software-Seite müsste lediglich die Einleselogik der Daten auf die neue Datenablage angepasst werden. Die vorverarbeiteten Daten vom Gateway werden danach wie bisher in der Cloud gespeichert und dort nach Bedarf kombiniert und zusammengefasst, um daraus die nötigen Modelle und Konditionierungsstrategien abzuleiten.

7.2 Vorteile der Edge Verarbeitung

+ Reduzierte Kosten

Durch die starke Kompression der Daten in der Vorverarbeitung wird die zu übertragende Datenmenge in die Cloud um ca. 200-fach reduziert. Die so anfallenden Datenmengen sind unproblematisch für Abonnements bei Mobilfunkanbieter und reduzieren die Kosten der SIM-Karten beträchtlich.

Ausserdem werden durch die Vorverarbeitung auf dem Gateway weniger Cloudressourcen benötigt, was wiederum zu Einsparungen bei den Cloudkosten beiträgt.

+ Geringere Latenzzeit

Durch die direkte Verarbeitung auf dem Gerät können die erfassten Messdaten schneller analysiert werden und so im Bedarfsfall schneller auf Ereignisse reagiert werden.

+ Unabhängigkeit von Clouddiensten

Wenn ausreichende Rechenleistung auf dem Fahrzeug vorhanden ist, kann längerfristig ein Cloud-unabhängiges System ausgebaut werden, welches die Abhängigkeit von externen Anbietern und Ressourcen minimiert

7.3 Nachteile der Edge Verarbeitung

- Erhöhter Wartungsaufwand

Durch die Verteilung der Vorverarbeitung auf die einzelnen Fahrzeuge muss auch für jedes Fahrzeug die Softwareversion einzeln unterhalten und gewartet werden. So müssen Aktualisierungen und Bugfixes orchestriert werden, auch wenn Fahrzeuge temporär oder längerfristig offline sind. Somit steigt das Risiko für kontaminierte und fehlerhafte Daten, welche nachgelagerte Verarbeitungsschritte beeinträchtigen.

- Verlust der systematischen historischen Datengrundlage

Wenn zur Kostenoptimierung nur noch sporadisch oder gar keine Rohdaten mehr übertragen werden, wird die Nachvollziehbarkeit und Weiterentwicklung des Systems erschwert. Solange systematisch historische Daten vorliegen, kann jede Entscheidung des Systems nachvollzogen und auch nachgerechnet werden. Fehlt diese Grundlage ist die Nachvollziehbarkeit nicht mehr lückenlos gegeben. Dies beeinträchtigt auch die Weiterentwicklung des Systems. Werden Teile des Systems weiterentwickelt, so müsste eine längere Testphase stattfinden, bevor die Lösung validiert werden kann. Liegen systematische historische Daten vor kann die Lösung auf diesen Daten getestet und validiert werden und so deutlich schneller produktiv eingesetzt werden.

Zur Abschwächung dieser Probleme könnte ein lokaler Speicher als Puffer zum Einsatz kommen, welcher die Rohdaten für einen bestimmten Zeitraum aufnehmen kann und diese auch rückwirkend per Remotebefehl in die Cloud übertragen kann.

8 Referenzen

- [1] *P1 Projektbeschreibung – Bestandsaufnahme mit Projektbeschreibung, 1. Zwischenbericht, PO000003419, Felix Saur, PROSE AG, 31.03.2023*
- [2] *P3-Vorversuche – Planung, Durchführung und Analyse, 2. Zwischenbericht, PO000004554, Felix Saur, PROSE AG, 15.12.2023*
- [3] *P4 und P5 Systemevaluation und Prototyp – Planung, Durchführung und Analyse, 3. Zwischenbericht, PO000005009, Felix Saur, Sebastian Linert, Joel Zbinden, 10.06.2024*
- [4] *Karte mit Einwohner gemäss Zählung 2023, Internetseite aufgerufen am 30.07.2025, https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de¢er=2599662.66,1199346.92&z=7.62&topic=ech&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude_wohnungen_register,f;ch.bav.haltestellen-oev,f;ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,f;ch.vbs.schiessanzeigen,f;ch.astra.wanderland-sperrungen_umleitungen,f;ch.bfs.volkszaehlung-bevoelkerungsstatistik_einwohner@year=2023@features=9859006,,0.36&bglayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&featureInfo=tooltip*
- [5] *Selbsterregte Radsatz-Torsionsschwingungen von Schienenfahrzeugen mit erhöhter Kraftschlussausnutzung, Felix Saur, Shaker Verlag 2024, ISBN 978-3-8440-9567-8*
- [6] *Richtlinie Lärmschutz bei Eisenbahnanlagen, BAV-232//249, Version V 2.0_d, Bundesamt für Verkehr, 15.09.2023*
- [7] *Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhältnismässigkeit von Lärmschutzmassnahmen, Markus Bichsel (Grolimund & Partner AG), Herausgeber BAFU 2006*
- [8] *City Statistics: Das Wetter im Städtevergleich, Themenblatt zu City Statistics – Wetter, Mai 2023, Stadt Bern Präsidialdirektion, aufgerufen am 13.08.2025; <https://www.bern.ch/themen/stadt-recht-und-politik/bern-in-zahlen/publikationen/2021-2025/download-2021-2025/2023-05-11-citystatistics-2021-wetter-tb.pdf>*
- [9] *RET-Gerät, <https://www.parametric.ch/de/produkte/ret-messsystem-fuer-infrastruktur/ret4000>, aufgerufen am 14.08.2025*
- [10] *Verwendete Wetter API: <https://openweathermap.org/>, aufgerufen am 14.08.2025*

A Konfusionsmatrix

